

平成 23 年度

地 層 処 分 技 術 調 査 等 事 業

(地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発)
-岩盤中物質移行特性評価技術高度化調査-

報 告 書

平成 24 年 3 月

財団法人 電 力 中 央 研 究 所

目 次

1. 研究概要-----	1-1
1.1 本研究の背景-----	1-1
1.2 目的-----	1-1
1.3 全体計画-----	1-1
1.3.1 研究の内容-----	1-1
1.3.2 研究工程-----	1-2
1.4 本年度の実施概要-----	1-3
1.4.1 トレーサ試験技術の開発-----	1-3
1.4.2 各種割れ目探査技術の開発-----	1-3
1.4.3 原位置での実証-----	1-3
2. 原位置トレーサ試験装置の試作-----	2-1
2.1 はじめに-----	2-1
2.2 耐圧型トレーサ注水部・揚水部の試作-----	2-3
2.2.1 仕様-----	2-3
2.2.2 パッカー一体型トレーサ試験形成装置の構造-----	2-3
2.2.2.1 パッカー部構造の変更-----	2-6
2.2.2.2 試験区間形成方法の変更-----	2-8
2.2.2.3 孔径拡大時のパッカーラバー異常拡張防止構造-----	2-10
2.2.2.4 トレーサ注水・揚水部の形状検討-----	2-11
2.2.3 パッカー一体型トレーサ試験形成装置の性能確認試験-----	2-14
2.2.3.1 配管系の耐圧性能確認試験-----	2-14
2.2.3.2 ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験-----	2-16
2.2.3.3 パッカー拡張試験-----	2-18
2.2.3.4 パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験-----	2-21
2.2.2.5 トレーサの置換に関する室内実験-----	2-23
2.2.2.6 試験区間形成部材の吸着試験-----	2-33
2.3 高精度圧力計への変更-----	2-38
2.3.1 圧力計の仕様-----	2-38
2.3.2 圧力計の変更箇所-----	2-39

2.3.3	圧力表示計、接続ケーブルの変更、および圧力計用信号変換器の追加	2-40
2.3.4	計測ソフトウェアの変更	2-43
2.3.5	新規デジタル圧力計のノイズ対策	2-45
2.3.5.1	改良前ノイズ状況	2-45
2.3.5.2	ノイズ対策	2-47
2.3.5.3	改良後ノイズ状況	2-49
2.3.6	高精度圧力計システムの性能確認試験	2-51
2.3.6.1	圧力表示計の確認	2-51
2.3.6.2	試験方法	2-52
2.3.6.3	試験結果	2-53
2.4	無脈動ポンプ部の改良	2-56
2.4.1	無脈動ポンプの耐圧性能の改良	2-56
2.4.2	ポンプケーシング部の内容積減少のための改良	2-58
2.4.3	無脈動ポンプの性能確認試験	2-61
2.4.3.1	耐圧性能確認試験	2-61
2.4.3.2	トレーサ濃度分散低減効果確認試験	2-64
2.5	まとめ	2-78
3.	ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発	3-1
3.1	試験試料の分析	3-1
3.2	分析方法	3-2
3.3	分析結果	3-3
3.4	試料の物性	3-9
3.4.1	比表面積	3-9
3.4.1.1	比表面積の測定方法	3-9
3.4.1.2	比表面積の測定結果	3-9
3.4.2	間隙分布	3-10
3.4.2.1	間隙分布の測定方法	3-10
3.4.2.2	間隙分布の測定結果	3-10
3.5	ラドンの発生量試験	3-13
3.5.1	試験方法	3-13
3.5.2	試験結果	3-13

4.	高粘性流体の注入による割れ目調査技術の開発	4-1
4.1	研究背景	4-1
4.2	研究目的および実施概要	4-2
4.2.1	試験原理の概要	4-2
4.2.2	昨年度までの成果と課題	4-4
4.2.3	今年度実施計画	4-5
4.3	室内高粘性流体注入試験	4-6
4.3.1	鋼管を用いた高粘性流体試験	4-6
4.3.2	軸対称モデルを用いた高粘性流体試験	4-21
4.3.3	室内試験結果のまとめ	4-43
4.4	高粘性流体注入の解析的検討	4-44
4.4.1	高粘性流体の解析理論	4-44
4.4.2	一次元の高透水場が存在する場合	4-45
4.4.3	円形の高透水場が存在する場合	4-52
4.4.4	乱数で発生させた場合	4-58
4.4.5	高粘性流体の広がり解析的な検討のまとめ	4-61
4.5	原位置試験の評価	4-62
4.5.1	14m 地点での試験結果	4-62
4.5.2	25m 地点での試験結果	4-65
4.5.3	原位置試験結果の時間微分に基づく方法での評価	4-67
4.6	まとめと今後の課題	4-68
5.	物理探査による割れ目探査技術の開発	5-1
5.1	はじめに	5-1
5.1.1	背景	5-1
5.1.2	目的	5-4
5.2	概要	5-4
5.2.1	昨年度実施内容と成果	5-4
5.2.2	基礎理論	5-5
5.2.2.1	フレネルボリュームを用いた逆計算	5-5
5.2.2.2	音響トモグラフィ法	5-7

5.3	実験内容および結果	5-10
5.3.1	実験概要	5-10
5.3.1.1	岩石ブロックによる計測・解析	5-11
5.3.1.2	GTSデータの3次元再解析	5-12
5.3.2	岩石ブロックによる計測・解析	5-12
5.3.2.1	岩石ブロックの作成	5-12
5.3.2.2	岩石ブロックによる計測	5-20
5.3.2.3	岩石ブロックの計測結果	5-23
5.3.2.4	岩石ブロックの解析における異方性の検討	5-34
5.3.2.5	亀裂幅の検討 (case 1-1 から case1-3)	5-37
5.3.2.6	亀裂間隔の検討 (case 2-1、case3-1)	5-38
5.3.2.7	3次元計測・解析の結果	5-39
5.3.3	GTS(グリムゼルテストサイト)データの3次元解析	5-48
5.3.3.1	計測内容	5-49
5.3.3.2	異方性の補正	5-54
5.3.3.3	解析結果	5-57
5.4	考察	5-63
5.4.1	岩石ブロックの実験結果との比較	5-63
5.4.2	岩石ブロック実験における割れ目の状態と計測結果について	5-67
5.4.3	GTS(グリムゼルテストサイト)データの3次元解析の精度	5-67
5.4.4	解析周波数の影響(フレネルボリュームの幅の影響)	5-68
6.	国外の適用性試験場での樹脂注入試験	6-1
6.1	はじめに	6-1
6.2	実証試験サイト	6-1
6.2.1	Grimsel Test Site	6-1
6.2.2	BK エリア	6-5
6.2.3	レジンを注入する対象割れ目	6-6
6.3	レジン注入試験	6-9
6.3.1	レジン注入試験装置	6-9
6.3.1.1	パッカーシステム部	6-9
6.3.1.2	レジン注入システム	6-10

6.3.2	レジン選定	6-12
6.3.3	パッカーシステムの配置	6-12
6.3.4	レジン注入方法	6-16
6.3.4.1	イソプロパノールの注入	6-16
6.3.4.2	レジンの注入	6-16
6.3.5	レジン注入試験結果	6-18
6.4	大孔径ボーリング	6-22
6.5	コア調査	6-24
6.5.1	C-FRS11.001 孔	6-24
6.5.2	C-FRS11.002 孔	6-26
6.5.3	C-FRS11.003 孔	6-27
6.5.4	C-FRS11.004 孔	6-28
6.5.5	C-C-FRS.005 孔	6-29
6.5.6	コア観察結果	6-31
6.6	ボアホール TV 計測	6-32
6.6.1	C-FRS11.001 孔	6-33
6.6.2	C-FRS11.002 孔	6-34
6.6.3	C-FRS11.003 孔	6-35
6.6.4	C-FRS11.003 孔	6-37
6.6.5	C-C-FRS.005 孔	6-38
6.6.6	ボアホール TV 観察結果	6-40
6.6.6.1	FZ1 の形態的特長	6-40
6.6.6.2	FZ1 の間隙分布	6-44
6.7	X 線 CT 解析	6-48
6.7.1	X 線 CT 解析方法	6-48
6.7.2	X 線 CT 解析結果	6-48
6.8	微視的観察	6-55
6.8.1	レジンの微視的観察方法	6-55
6.8.2	レジンの微視的観察結果	6-57
6.8.2.1	レジン注入割れ目の微視的特徴	6-57
6.8.2.2	レジン注入割れ目の間隙幅	6-59

7. 国内適用性試験場の地質環境の調査	7-1
7.1 分析試料	7-1
7.2 分析方法	7-2
7.3 分析結果	7-3
7.3.1 試料の化学組成の特徴	7-3
7.3.2 分析コードによる分析結果の違い	7-11
7.4 鉍物分析	7-14
7.4.1 鉍物分析手順	7-15
7.4.1.1 水ひ処理	7-15
7.4.1.2 エチレングリコール処理	7-15
7.4.1.3 塩酸処理	7-15
7.4.2 鉍物分析結果	7-15
7.5 物性試験	7-17
7.5.1 間隙率	7-17
7.5.1.1 間隙率の測定方法	7-17
7.5.1.2 間隙率の測定結果	7-18
7.5.2 比表面積	7-19
7.5.2.1 比表面積の測定方法	7-19
7.5.2.2 比表面積の測定結果	7-19
7.5.3 間隙分布	7-21
7.5.3.1 間隙分布の測定方法	7-21
7.5.3.2 間隙分布の測定結果	7-21
7.6 陽イオン交換容量の測定	7-27
7.6.1 測定試料	7-27
7.6.2 測定方法	7-27
7.6.2.1 測定に使用した装置および薬品	7-27
7.6.2.2 測定手順	7-29
7.6.3 分析方法および分析結果	7-30
8. まとめと今後の課題	8-1
8.1 トレーサ試験技術の開発	8-1
8.2 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発	8-2

8.3	高粘性流体の注入による割れ目調査技術の開発	8-2
8.4	物理探査による割れ目調査技術の開発	8-3
8.5	国外の適用性試験場での樹脂注入試験	8-4
8.6	国内適用性試験場の地質環境の調査	8-6

図 目 次

2章 図 目 次

図 2.1-1	試験装置概念図	2-2
図 2.2-1	従来型の試験区間形成と本年度試作した試験区間形状を概念図	2-3
図 2.2-2	パッカー一体型トレーサ試験区間形成装置の構造図	2-4
図 2.2-3	パッカー一体型トレーサ試験区間形成装置の設計図面	2-5
図 2.2-4	従来方式のパッカー部	2-6
図 2.2-5	変更したパッカー部構造図	2-6
図 2.2-6	試作したパッカー部	2-7
図 2.2-7	パッカーラバー	2-7
図 2.2-8	従来方式の試験区間	2-8
図 2.2-9	変更した試験区間の形成方法	2-9
図 2.2-10	ポート付きパッカー構成図	2-9
図 2.2-11	変更した試験区間形成状況	2-9
図 2.2-12	変更した試験区間断面図	2-10
図 2.2-13	パッカーラバー異常拡張防止構造図	2-10
図 2.2-14	孔径拡大時のパッカーラバー異常拡張防止イメージ図	2-11
図 2.2-15	金属プレートを装着した試験区間部	2-11
図 2.2-16	従来方式のトレーサ注水部写真	2-12
図 2.2-17	従来方式のトレーサ注水構造図（断面図）	2-12
図 2.2-18	変更したトレーサ注水・揚水部構造図（断面図）	2-13
図 2.2-19	試作したトレーサ注水・揚水部のパーツ	2-13
図 2.2-20	試作したトレーサ注水・揚水部（パッカー拡張時の作動状況）	2-13
図 2.2-21	試作したトレーサ注水・揚水部（パッカー収縮時の作動状況）	2-14
図 2.2-22	耐圧性能確認試験概略図	2-14
図 2.2-23	耐圧試験状況（芯金部）	2-15
図 2.2-24	耐圧試験状況（全景）	2-16
図 2.2-25	ピストン抜け防止構造図	2-16
図 2.2-26	ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験概略図	2-17
図 2.2-27	耐圧性能確認状況	2-17
図 2.2-28	ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験結果（トレーサ注水ライン加圧時）	2-18

図 2.2-29	ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験結果（トレーサ揚水ライン加圧時）	--- 2-18
図 2.2-30	パッカー拡張試験概略図	----- 2-19
図 2.2-31	パッカー拡張試験状況	----- 2-20
図 2.2-32	試験区間の形成状況（左写真：試験区間形成無し、右写真：試験区間形成有り）	--- 2-20
図 2.2-33	パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験概略図	----- 2-21
図 2.2-34	孔径拡大したボーリング孔を模擬したアクリル管	----- 2-21
図 2.2-35	パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験状況	----- 2-22
図 2.2-36	パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験状況	----- 2-22
図 2.2-37	PEEK 材スペーサーの配置パターン（左：M1、中：M2、右：M3）	----- 2-23
図 2.2-38	試験区間の形成例：メッシュパターン M1	----- 2-24
図 2.2-39	スペーサーの配置状態（上から 12MM、10MM、8MM）	----- 2-25
図 2.2-40	実験装置概念図および配管内容積	----- 2-26
図 2.2-41	実験風景 1	----- 2-27
図 2.2-42	実験風景 2	----- 2-27
図 2.2-43	流量 150CC/MIN 時の試験パターン 1、4、7	----- 2-28
図 2.2-44	流量 100CC/MIN 時の試験パターン 2、5、8	----- 2-29
図 2.2-45	流量 50CC/MIN 時の試験パターン 3、6、9	----- 2-30
図 2.2-46	排水側の置換時間とメッシュ形状	----- 2-31
図 2.2-47	メッシュ通過時の圧力損失抵抗	----- 2-32
図 2.2-48	入力側の濃度の経時変化	----- 2-33
図 2.2-49	ポリエステルメッシュ 5500	----- 2-34
図 2.2-50	ポリエステルメッシュ 5900	----- 2-34
図 2.2-51	PEEK450G スペーサー	----- 2-34
図 2.2-52	吸着試験状況（左：試験試料 右：振とう風景）	----- 2-36
図 2.2-53	CS 吸着試験結果	----- 2-37
図 2.2-54	SR 吸着試験結果	----- 2-37
図 2.2-55	NA 吸着試験結果	----- 2-38
図 2.3-1	MENSOR 社製 CPT6000	----- 2-39
図 2.3-2	圧力計変更箇所	----- 2-40
図 2.3-3	圧力計および表示計の配線図	----- 2-41
図 2.3-4	CPT6000 用接続ケーブル	----- 2-42
図 2.3-5	参考図（平成 22 年度追加分 DPT6000 用接続ケーブル）	----- 2-42

図 2.3-6	表示器 403E-A 用接続ケーブル	2-42
図 2.3-7	計測設定ダイアログ画面	2-43
図 2.3-8	デジタル圧力計設定画面	2-43
図 2.3-9	デジタル圧力計設定例	2-44
図 2.3-10	机上に置いた際のノイズレベル	2-45
図 2.3-11	床面に置いた際のノイズレベル	2-45
図 2.3-12	コネクタとアース線の接続状況	2-46
図 2.3-13	コネクタとアース線の接続によるノイズ低減の効果	2-46
図 2.3-14	アース線による信号線とセンサの接続	2-47
図 2.3-15	対策案 グランド線への抵抗追加	2-47
図 2.3-16	グランド線への抵抗追加	2-47
図 2.3-17	CPT6000 取扱説明書内 RS-485CABLING	2-48
図 2.3-18	ケーブル改良前後の CPT6000 データ	2-49
図 2.3-19	CPT6000 (揚水側 NO.8) のノイズレベル	2-50
図 2.3-20	CPT6000 (揚水側 NO.9) のノイズレベル	2-50
図 2.3-21	DPT6000 に改良新ケーブルを接続した際のノイズレベル	2-51
図 2.3-22	変更後の注入側圧力表示計	2-51
図 2.3-23	変更後の揚水側圧力表示計	2-52
図 2.3-24	圧力計取り付け状況	2-53
図 2.3-25	性能確認試験状況	2-53
図 2.3-26	性能確認試験中に計測用 PC で計測された圧力変化	2-54
図 2.3-27	性能確認試験中の計測プログラム確認状況	2-55
図 2.3-28	性能確認試験中の計測プログラム確認状況拡大図	2-56
図 2.4-1	無脈動ポンプの構造とメカニカルシール部の位置	2-57
図 2.4-2	バリシールの構造	2-57
図 2.4-3	改良前と改良後のシール (写真)	2-57
図 2.4-4	改良前ケーシング部	2-59
図 2.4-5	改良後ケーシング部	2-59
図 2.4-6	ケーシング部の改良前後写真	2-60
図 2.4-7	ケーシング内部装置の改良前後写真	2-60
図 2.4-8	ケーシング内容積測定状況	2-60
図 2.4-9	無脈動ポンプの耐圧試験概念図	2-61

図 2.4-10	耐圧性能確認試験時の圧力・流量結果	2-62
図 2.4-11	耐圧性能確認試験後ケーシング部写真	2-63
図 2.4-12	耐圧性能確認試験後 スターター連結部（左写真）と軸封部（右写真）	2-63
図 2.4-13	耐圧性能確認試験後 プラグ部（左写真）と吸い込み口（右写真）	2-63
図 2.4-14	濃度分散低減効果確認試験構成の概念図	2-64
図 2.4-15	濃度分散低減効果確認試験状況	2-65
図 2.4-16	改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 400ML/MIN）	2-66
図 2.4-17	改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 400ML/MIN 1 回目）	2-66
図 2.4-18	改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 400ML/MIN 2 回目）	2-67
図 2.4-19	改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 400ML/MIN 3 回目）	2-67
図 2.4-20	改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ML/MIN）	2-68
図 2.4-21	改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ML/MIN 1 回目）	2-69
図 2.4-22	改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ML/MIN 2 回目）	2-69
図 2.4-23	改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ML/MIN 3 回目）	2-70
図 2.4-24	改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 400ML/MIN）	2-71
図 2.4-25	改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 400ML/MIN 1 回目）	2-71
図 2.4-26	改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 400ML/MIN 2 回目）	2-72
図 2.4-27	改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 400ML/MIN 3 回目）	2-72
図 2.4-28	改良前後比較結果（流量 400ML/MIN） 水→トレーサ切り替え時	2-73
図 2.4-29	改良前後比較結果（流量 400ML/MIN） トレーサ→水切り替え時	2-73
図 2.4-30	改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ML/MIN）	2-74
図 2.4-31	改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ML/MIN1 回目）	2-75
図 2.4-32	改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ML/MIN2 回目）	2-75
図 2.4-33	改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ML/MIN3 回目）	2-76
図 2.4-34	改良前後比較結果（流量 1000ML/MIN） 水→トレーサ切り替え時	2-76
図 2.4-35	改良前後比較結果（流量 1000ML/MIN） トレーサ→水切り替え時	2-77

3章 図 目 次

図 3.1-1	試料写真	3-2
図 3.3-1	試料の CNK 図	3-4
図 3.3-2	試料の希土類パターン（コンドライト規格化図）	3-7
図 3.3-3	試料の希土類元素相関	3-8

図 3.4-1 間隙径分布 (試料 1)	3-11
図 3.4-2 間隙径分布 (試料 2)	3-11
図 3.4-3 間隙径分布 (試料 3)	3-12
図 3.4-4 間隙径分布 (試料 4)	3-12
図 3.5.2-1 表面積とラドンフラックスの関係 (想定)	3-13
図 3.5.2-2 粒径とラドンフラックスの関係	3-14
図 3.5.2-3 表面積とラドンフラックスの関係 (結果に基づいた推定)	3-15

4 章 図 目 次

図 4.1-1 流れの次元とトレーサの広がり の概念図	4-2
図 4.2-1 高粘性流体試験の概念図	4-3
図 4.3.1-1 鋼管による流動試験の試験装置概略図	4-9
図 4.3.1-2 1/8inch 鋼管に高粘性流体を注入した場合の試験結果	4-11
図 4.3.1-3 1/8 inch 鋼管における高粘性流体注入での管径の評価結果	4-13
図 4.3.1-4 1/8' inch 鋼管における高粘性流体注入での管径の評価結果	4-13
図 4.3.1-5 1/8' inch 鋼管における高粘性流体注入での管径の評価結果	4-14
図 4.3.1-6 1/8' +1/8+1/8' (各 4m) の場合の実験結果	4-15
図 4.3.1-7 3/16+1/8+1/8' (各 4m) の場合の実験結果	4-16
図 4.3.1-8 1/8' +1/8+1/8' +1/8+1/8' (各 2m) の場合の実験結果	4-16
図 4.3.1-9 3/16+1/8+1/8' +3/16+1/8+1/8' (各 2m) の場合の実験結果	4-16
図 4.3.2-1 高粘性流体の注入圧力の経時変化	4-23
図 4.3.2-2 Jacob 的な評価方法の概念図	4-24
図 4.3.2-3 高粘性流体の浸潤前線の広がり	4-26
図 4.3.2-4 高粘性流体試験における透水量係数と割れ目幅の時間的な評価結果の変化	4-26
図 4.3.2-5 軸対称割れ目モデル図	4-27
図 4.3.2-6 軸対称割れ目モデルでの試験状況	4-29
図 4.3.2-7 割れ目幅 0.2mm への高粘性流体(100cp 程度)の注入試験結果	4-31
図 4.3.2-8 割れ目幅 0.3 mm への高粘性流体(200cp 程度)の注入試験結果	4-32
図 4.3.2-9 割れ目幅 0.15 mm への高粘性流体(200cp 程度)の注入試験結果	4-32
図 4.3.2-10 時間微分による透水量係数の評価結果 (割れ目幅 0.2mm)	4-33
図 4.3.2-11 時間微分による透水量係数の評価結果 (割れ目幅 0.3 mm)	4-34
図 4.3.2-12 時間微分による透水量係数の評価結果 (割れ目幅 0.15 mm)	4-34

図 4. 3. 2-13	割れ目幅が 2 段階の場合の試験結果 ($R < 0.2 \text{ m}$: 0.3 mm , $R > 0.2 \text{ m}$: 0.15 mm)	--- 4-37
図 4. 3. 2-14	割れ目幅が 2 段階の場合の試験結果 ($R < 0.3 \text{ m}$: 0.3 mm , $R > 0.2 \text{ m}$: 0.15 mm)	--- 4-38
図 4. 3. 2-15	割れ目幅が 2 段階の場合の試験結果 ($R < 0.4 \text{ m}$: 0.3 mm , $R > 0.4 \text{ m}$: 0.15 mm)	--- 4-39
図 4. 3. 2-16	割れ目幅が 2 段階の場合の試験結果 ($R < 0.4 \text{ m}$: 0.15 mm , $R > 0.4 \text{ m}$: 0.2 mm)	-- 4-40
図 4. 3. 2-17	割れ目幅が 3 段階の場合の試験結果 ($R < 0.3 \text{ m}$: 0.3 mm , $R < 0.5 \text{ m}$: 0.2 mm , $R < 0.7 \text{ m}$: 0.15 mm)	----- 4-41
図 4. 3. 2-18	割れ目幅が 3 段階の場合の試験結果 ($R < 0.3 \text{ m}$: 0.15 mm , $R < 0.5 \text{ m}$: 0.2 mm , $R < 0.7 \text{ m}$: 0.3 mm)	----- 4-42
図 4. 4. 2-1	解析領域および解析条件図	----- 4-45
図 4. 4. 2-2	注入圧力の経時変化	----- 4-46
図 4. 4. 2-3	注入圧力の対数時間に対する変化	----- 4-47
図 4. 4. 2-4	観測孔 (0, 1) での注入圧力の経時変化	----- 4-47
図 4. 4. 2-5	観測孔 (2, 0) での注入圧力の経時変化	----- 4-47
図 4. 4. 2-6	注入 (0, 1) における注入圧力の経時変化	----- 4-49
図 4. 4. 2-7	注入 (0, 2) における注入圧力の経時変化	----- 4-49
図 4. 4. 2-8	注入 (0, 1) における観測孔 (-1, 1) の圧力の経時変化	----- 4-49
図 4. 4. 2-9	注入 (0, 1) における観測孔 (0, 2) の圧力の経時変化	----- 4-50
図 4. 4. 2-10	注入 (0, 1) における観測孔 (-2, 1) の圧力の経時変化	----- 4-50
図 4. 4. 2-11	注入 (0, 1) における観測孔 (0, 3) の圧力の経時変化	----- 4-50
図 4. 4. 2-12	注入 (0, 1) における観測孔 (0, -1) の圧力の経時変化	----- 4-51
図 4. 4. 2-13	注入 (0, 2) における観測孔 (0, 1) の圧力の経時変化	----- 4-51
図 4. 4. 2-14	注入 (0, 2) における観測孔 (0, 3) の圧力の経時変化	----- 4-51
図 4. 4. 3-1	円形の高透水場が存在する場合の解析条件図	----- 4-52
図 4. 4. 3-2	注入圧力の経時変化	----- 4-53
図 4. 4. 3-3	注入圧力の対数時間に対する変化	----- 4-53
図 4. 4. 3-4	周辺孔 (0, 1) での圧力応答	----- 4-53
図 4. 4. 3-5	周辺孔 (0, 2) での圧力応答	----- 4-54
図 4. 4. 3-6	注入孔 (0, 1) での圧力応答	----- 4-55
図 4. 4. 3-7	注入孔 (0, 2) での圧力応答	----- 4-55
図 4. 4. 3-8	注入孔 (0, 1) での (0, 0) の圧力応答	----- 4-55
図 4. 4. 3-9	注入孔 (0, 1) での (0, 2) の圧力応答	----- 4-56
図 4. 4. 3-10	注入孔 (0, 1) での高粘性流体の広がり	----- 4-56

図 4. 4. 3-11	注入孔 (0, 2) での (0, 1) の圧力応答	4-57
図 4. 4. 3-12	注入孔 (0, 2) での (0, 3) の圧力応答	4-57
図 4. 4. 4-1	確率論的に発生させた透水係数場	4-58
図 4. 4. 4-2	高粘性流体の広がり の時間変化	4-59
図 4. 4. 4-3	注入孔 (0, 0) での圧力の時間変化	4-59
図 4. 4. 4-4	注入孔から 1m 離れた地点での圧力の時間変化	4-60
図 4. 4. 4-5	注入孔から 2m 離れた地点での圧力の時間変化	4-60
図 4. 5. 1-1	14m 地点でのボーリング孔配置と各孔での透水量係数	4-63
図 4. 5. 1-2	注入孔および観測孔での圧力の経時変化	4-63
図 4. 5. 1-3	Jacob 的な方法による透水量係数の変化の評価結果	4-64
図 4. 5. 1-4	圧力応答から想定される透水係数場	4-64
図 4. 5. 1-5	時間微分に基づく透水量係数の推定結果(14m 地点)	4-64
図 4. 5. 2-1	14m 地点でのボーリング孔配置と各孔での透水量係数	4-65
図 4. 5. 2-2	注入孔および観測孔での圧力の経時変化	4-66
図 4. 5. 2-3	圧力応答から想定される透水係数場	4-66
図 4. 5. 2-4	時間微分に基づく透水量係数の推定結果(25m 地点)	4-66

5 章 図 目 次

図 5. 1-1	本研究の探査規模および対象目的とする「水みち」となる割れ目帯	5-3
図 5. 1-2	本研究で扱う音響トモグラフィ法の概念図	5-3
図 5. 2. 1-1	ステップ式解析の概要	5-5
図 5. 2. 2-1	フレネルボリュームの概念	5-6
図 5. 2. 2-2	ART 法の概念	5-7
図 5. 2. 2-3	音響トモグラフィの概要	5-9
図 5. 2. 2-4	擬似ランダム波の計測例(上 発振波、中 受信波、下 相関計算後の受信波)	5-9
図 5. 2. 2-5	音響トモグラフィによる計測例、砂層中における相関関数の波形とパワースペクトル	5-10
図 5. 2. 2-6	波線解析の概要	5-10
図 5. 3. 2-1	実験を行った岩石ブロック寸法図	5-13
図 5. 3. 2-2	実験ケースの比較	5-14
図 5. 3. 2-3	岩石搬入状況	5-15
図 5. 3. 2-4	岩石組立て状況	5-16

図 5.3.2-5	スペーサーの設置状況	5-16
図 5.3.2-6	実験に用いたビニールの水槽	5-17
図 5.3.2-7	センサー設置状況	5-17
図 5.3.2-8	水槽内部に水を張った状態	5-18
図 5.3.2-9	計測状況	5-18
図 5.3.2-10	計測装置	5-19
図 5.3.2-11	岩石ブロック実験の手順	5-20
図 5.3.2-12	岩石ブロックのセンサー配置(○はセンサー位置)	5-21
図 5.3.2-13	岩石ブロック計測状況	5-22
図 5.3.2-14	センサー設置状況	5-22
図 5.3.2-15	粘土の作成状況	5-23
図 5.3.2-16	受信波形 (case1-3 発振周波数 156kHz、発振位置 0.04m)	5-25
図 5.3.2-17	受信波形 (case1-3 発振周波数 156kHz、発振位置 0.24m)	5-25
図 5.3.2-18	受信波形 (case1-3 発振周波数 156kHz、発振位置 0.46m)	5-26
図 5.3.2-19	受信波形 (case1-3 発振周波数 78kHz、発振位置 0.04m)	5-26
図 5.3.2-20	受信波形 (case1-3 発振周波数 78kHz、発振位置 0.24m)	5-27
図 5.3.2-21	受信波形 (case1-3 発振周波数 78kHz、発振位置 0.46m)	5-27
図 5.3.2-22	受信波形 (case1-3 発振周波数 52kHz、発振位置 0.04m)	5-28
図 5.3.2-23	受信波形 (case1-3 発振周波数 52kHz、発振位置 0.24m)	5-28
図 5.3.2-24	受信波形 (case1-3 発振周波数 52kHz、発振位置 0.46m)	5-29
図 5.3.2-25	受信波形 (case1-3 発振周波数 31kHz、発振位置 0.04m)	5-29
図 5.3.2-26	受信波形 (case1-3 発振周波数 31kHz、発振位置 0.24m)	5-30
図 5.3.2-27	受信波形 (case1-3 発振周波数 31kHz、発振位置 0.46m)	5-30
図 5.3.2-28	水平波線の結果 case1-1	5-31
図 5.3.2-29	水平波線の結果 case1-2	5-31
図 5.3.2-30	水平波線の結果 case1-3	5-32
図 5.3.2-31	水平波線の結果 case2-1	5-32
図 5.3.2-32	水平波線の結果 case3-1	5-33
図 5.3.2-33	水平な波線の概念	5-33
図 5.3.2-34	異方性の例	5-35
図 5.3.2-35	シミュレーション計算に用いたモデル	5-35
図 5.3.2-36	受信波形とシミュレーション結果との比較(左 発振位置 天端から 0.06m)	5-36

図 5.3.2-37	異方性補正前後の結果の比較	5-36
図 5.3.2-38	逆計算結果 case1-1(亀裂幅 0.2mm)	5-37
図 5.3.2-39	逆計算結果 case1-2(亀裂幅 0.5mm)	5-37
図 5.3.2-40	逆計算結果 case1-3(亀裂幅 2mm)	5-38
図 5.3.2-41	逆計算結果 case2-1(亀裂間隔 50mm)	5-39
図 5.3.2-42	逆計算結果 case3-1(亀裂間隔 100mm)	5-39
図 5.3.2-43	3次元データの取得	5-40
図 5.3.2-44	3次元解析の結果、ステップ式解析効果の比較(速度)	5-41
図 5.3.2-45	3次元解析の結果、ステップ式解析効果の比較(減衰率)	5-41
図 5.3.2-46	3次元解析結果 case1-4 速度	5-42
図 5.3.2-47	3次元解析結果 case1-4 減衰率	5-43
図 5.3.2-48	3次元解析結果 case1-5 速度	5-44
図 5.3.2-49	3次元解析結果 case1-5 減衰率	5-45
図 5.3.2-50	3次元解析結果 case3-2 速度	5-46
図 5.3.2-51	3次元解析結果 case3-2 減衰率	5-47
図 5.3.3-1	H22 年度 3次元解析の結果の例(速度分布図、2009 年報告の断面 1 と同じ断面)	5-48
図 5.3.3-2	H22 年度 3次元解析の結果の例(減衰率分布図、2009 年報告の断面 1 と同じ断面)	5-49
図 5.3.3-3	グリムゼルテストサイト計測現場	5-49
図 5.3.3-4	グリムゼルテストサイト計測孔配置(孔口)	5-50
図 5.3.3-5	グリムゼルテストサイト計測孔レイアウト(X 軸方向から見た状態)	5-51
図 5.3.3-6	グリムゼルテストサイト計測孔レイアウト(孔口から見た状態)	5-51
図 5.3.3-7	異方性の補正方法	5-54
図 5.3.3-8	異方性の補正がうまくいった例	5-55
図 5.3.3-9	異方性の補正が不完全な例	5-55
図 5.3.3-10	異方性の補正(上から 08 年度断面 1、断面 2、09 年度断面 1、断面 2)	5-56
図 5.3.3-11	補正に用いた角度の計算方法	5-57
図 5.3.3-12	グリムゼルテストサイトの 2次元解析結果(左)、3次元解析結果(右)速度分布図	5-59
図 5.3.3-13	グリムゼルテストサイトの 2次元解析結果(左)、3次元解析結果(右)減衰率分布図	5-60
図 5.3.3-14	グリムゼルテストサイトの 3次元解析結果速度分布図	5-61
図 5.3.3-15	グリムゼルテストサイトの 3次元解析結果減衰率分布図	5-62
図 5.4.1-1	岩石コア資料の整形状況	5-63

図 5.4.1-2	岩石コアの計測結果(左：P 波速度、右：振幅) -----	5-64
図 5.4.1-3	孔口からの深度 10m 付近で BK85.008 に垂直な面で輪切りにした状態 -----	5-64
図 5.4.1-4	現場計測結果から得られた速度と音圧(振幅)の異方性 -----	5-65
図 5.4.1-5	岩石ブロックの計測結果と現場計測結果の比較 -----	5-66
図 5.4.1-6	GTS の計測孔の孔跡図と速度異方性の比較 -----	5-66
図 5.4.1-7	孔壁とのカップリング -----	5-66
図 5.4.4-1	セル内を通過する波線の数(左から解析周波数 10kHz、20kHz、30kHz) -----	5-68

6 章 図 目 次

図 6.2.1-1	スイス中央アルプスにおける GRIMSEL TEST SITE の位置 -----	6-2
図 6.2.1-2	GRIMSEL TEST SITE (1)地下研究施設 (2)RÄTERICHSBODEN 湖 (3) GRIMSEL 湖 -----	6-2
図 6.2.1-3	GRIMSEL 地域の地質と構造の概要 -----	6-3
図 6.2.1-4	GRIMSEL TEST SITE の地質断面図 -----	6-4
図 6.2.2-1	グリムゼルサイト平面図 -----	6-5
図 6.2.2-2	BK サイトにおけるボーリング孔配置の平面図および断面図 -----	6-6
図 6.2.3-1	対象割れ目 1 上でのボーリング孔の交差位置と単孔式水理試験による透水量係数 ---	6-8
図 6.2.3-2	対象割れ目 2 上でのボーリング孔の交差位置と単孔式水理試験による透水量係数 ---	6-8
図 6.3.1-1	レジン注入用パッカー部とスペース部の概念図 -----	6-9
図 6.3.1-2	レジン注入区間と注入ポート -----	6-10
図 6.3.1-3	レジン注入用パッカーと各ライン -----	6-10
図 6.3.1-4	レジン注入システムの概念図 -----	6-11
図 6.3.1-5	レジン注入システム -----	6-11
図 6.3.2-1	SIKA : INJECTION-26 と SIKADUR52 のレジン材作成後の粘性と時間の関係 -----	6-12
図 6.3.2-2	レジンへ添加したウラニンの蛍光反応(左：可視光、右：紫外線) -----	6-12
図 6.3.3-1	BK85.002 孔におけるレジン注入装置の設置図 -----	6-13
図 6.3.3-2	C-FRS08.001 孔におけるレジン注入装置の設置図 -----	6-14
図 6.3.3-3	C-FRS08.002 孔におけるレジン注入装置の設置図 -----	6-15
図 6.3.4-1	レジン注入風景 -----	6-16
図 6.3.5-1	レジンの注入工程と推定到達範囲図 -----	6-19
図 6.3.5-2	FZ1 へのレジン注入時の区間 (INTERVAL) の圧力 -----	6-19
図 6.3.5-3	レジンの注入工程と推定到達範囲図 -----	6-20
図 6.3.5-4	FZ2 へのレジン注入時の区間 (INTERVAL) の圧力 -----	6-21

図 6.4-1	C-FRS11.003 孔～C-C-FRS.005 孔（ピンクの孔番箇所）	6-23
図 6.4-2	FZ1 面における C-FRS11.001 孔～C-C-FRS.005 孔および既存孔の経過位置	6-23
図 6.5-1	コア調査状況	6-24
図 6.5.1-1	C-FRS11.001 孔のレジン充填箇所	6-25
図 6.5.1-2	C-FRS11.001 孔のレジン充填箇所	6-25
図 6.5.2-1	C-FRS11.002 孔のレジン充填箇所	6-26
図 6.5.2-2	C-FRS11.002 孔のレジン充填箇所	6-26
図 6.5.3-1	C-FRS11.003 孔のレジン充填箇所	6-27
図 6.5.3-2	C-FRS11.003 孔のレジン充填箇所	6-27
図 6.5.4-1	C-FRS11.004 孔のレジン充填箇所	6-28
図 6.5.4-2	C-FRS11.004 孔のレジン充填箇所	6-28
図 6.5.5-1	C-C-FRS.005 孔のレジン充填箇所	6-29
図 6.5.5-2	C-C-FRS.005 孔のレジン充填箇所	6-29
図 6.5.5-3	C-C-FRS.005 孔のレジン充填箇所	6-30
図 6.5.5-4	C-C-FRS.005 孔のレジン充填箇所	6-30
図 6.6-1	BIPS プローブ（孔壁の 360 度画像を取得）	6-32
図 6.6-2	HR-BTV プローブ（孔壁の詳細スポット画像を取得）	6-32
図 6.6-3	HR-BTV プローブによる詳細計測状況	6-32
図 6.6.1-1	C-FRS11.001 孔のボアホール TV 映像	6-33
図 6.6.2-1	C-FRS11.002 孔のボアホール TV 映像（2 条の割れ目のうち上部）	6-34
図 6.6.2-2	C-FRS11.002 孔のボアホール TV 映像（2 条の割れ目のうち下部）	6-35
図 6.6.3-1	C-FRS11.003 孔の FZ1 箇所の BIPS 展開画像および 3D（コア形状）表示	6-36
図 6.6.3-2	C-FRS11.003 孔の FZ1 箇所の HR-BTV 映像（展開画像の赤枠箇所を撮影）	6-36
図 6.6.4-1	C-FRS11.004 孔の FZ1 箇所の BIPS 展開画像および 3D（コア形状）表示	6-37
図 6.6.4-2	C-FRS11.004 孔の FZ1 箇所の HR-BTV 映像	6-37
図 6.6.4-3	C-FRS11.004 孔の FZ1 箇所の HR-BTV 映像	6-38
図 6.6.5-1	C-C-FRS.005 孔の FZ1 箇所の BIPS 展開画像および 3D（コア形状）表示	6-38
図 6.6.5-2	C-C-FRS.005 孔の FZ1 箇所の HR-BTV 映像	6-39
図 6.6.5-3	C-C-FRS.005 孔の FZ1 の交差割れ目の HR-BTV 映像	6-39
図 6.6.5-4	C-C-FRS.005 孔の FZ1 と交差する割れ目の HR-BTV 映像	6-40
図 6.6.6-1	ボアホール TV による FZ1 の位置および方向（紙面が FZ1 の面）	6-41
図 6.6.6-2	C-FRS11.001 孔～C-FRS.005 孔に認められたレジンが充填された割れ目の方向	6-42

図 6.6.6-3	平成 21 年度にボアホール TV で観測され FZ1 および共役割れ目の方向-----	6-42
図 6.6.6-4	ボアホール TV によって観察された FZ1 とその共役割れ目の特徴 -----	6-43
図 6.6.6-5	ボアホール TV により FZ1 (N66E/77SW) とその共役割れ目 (N28E/65NW) の分布 ---	6-44
図 6.6.6-6	ボアホール TV 観察によるレジンの幅および間隙 (開口) 幅 -----	6-45
図 6.6.6-7	ボアホールレジンの充填幅の概念図 -----	6-45
図 6.6.6-8	平成 21 年度ボアホール TV 観察による FZ1 の間隙 (開口) 幅と今年度観察したレジンの充填 幅 -----	6-46
図 6.6.6-9	間隙幅および充填幅の計測方法とガウジおよびレジンの充填状況 -----	6-47
図 6.6.6-10	コアにおけるガウジおよびレジンの充填状況 -----	6-47
図 6.7.2-1	X 線 CT 解析による各孔のスライス断面図および横断面図 (右横断面、左：スライス図) -----	6-49
図 6.7.2-2	C-FRS11.001 孔コアの X 線 CT 解析箇所の座標および寸法 -----	6-50
図 6.7.2-3	CT 画像とコア写真 (UV 光照射) -----	6-50
図 6.7.2-4	横断面図 (XY 断面：104MM X 52MM) -----	6-52
図 6.7.2-5	スライス断面図 (ZX 断面：173MM X 104MM) -----	6-53
図 6.7.2-6	横断面図 (YZ 断面：52MM X 173MM) -----	6-54
図 6.8.1-1	グリムゼルサイトにおける 2 次レジンの注入とコアの切断状況 -----	6-55
図 6.8.1-2	薄片作成箇所 -----	6-55
図 6.8.2-1	MAIN CHANNEL -----	6-57
図 6.8.2-2	SPLAY -----	6-58
図 6.8.2-3	SPLAY (カタクラサイト) -----	6-58
図 6.8.2-4	NETWORK -----	6-59
図 6.8.2-1	レジンの充填割れ目の間隙幅 (充填幅) -----	6-60

7 章 図 目 次

図 7.1-1	瑞浪 300m 坑道におけるボーリング -----	7-1
図 7.3.1-1	マトリクス試料の CNK 図 -----	7-4
図 7.3.1-2	マトリクス試料の希土類パターン (コンドライト規格化図) -----	7-9
図 7.3.1-3	マトリクス試料の希土類元素相関 -----	7-11
図 7.3.2-1	分析結果の違い (ME-MS81 と ME-MS61 の比較) -----	7-12
図 7.3.2-1	分析結果の違い (ME-MS81 と ME-MS61 の比較 (続き)) -----	7-13
図 7.5.1-1	純水の温度と密度の対応図 -----	7-17

図 7.5.2-1	各試料の比表面積	7-21
図 7.5.3-1	各試料の真密度と気孔率	7-22
図 7.5.3-2	各試料の平均細孔径と比表面積	7-22
図 7.5.3-3	比表面積と細孔径の関係、および細孔容積と細孔径の関係 (F-I)	7-23
図 7.5.3-4	比表面積と細孔径の関係、および細孔容積と細孔径の関係 (F-II)	7-23
図 7.5.3-5	比表面積と細孔径の関係、および細孔容積と細孔径の関係 (F-III-1)	7-24
図 7.5.3-6	比表面積と細孔径の関係、および細孔容積と細孔径の関係 (F-III-2)	7-24
図 7.5.3-7	比表面積と細孔径の関係、および細孔容積と細孔径の関係 (F-IV-1)	7-25
図 7.5.3-8	比表面積と細孔径の関係、および細孔容積と細孔径の関係 (F-IV-2)	7-25
図 7.5.3-9	比表面積と細孔径の関係、および細孔容積と細孔径の関係 (A-I)	7-26
図 7.5.3-10	比表面積と細孔径の関係、および細孔容積と細孔径の関係 (A-II)	7-26
図 7.6.2-1	IC 装置の外観	7-28
図 7.6.2-2	ICP-MS 装置の外観	7-28

表 目 次

1 章 表 目 次

表 1.3.2-1 研究工程	1-2
----------------	-----

2 章 表 目 次

表 2.1-1 トレーサ試験方法	2-1
表 2.2-1 製作した金属プレート仕様表	2-11
表 2.2-2 耐圧性能確認試験結果一覧	2-15
表 2.2-3 耐圧性能確認試験結果一覧	2-19
表 2.2-4 メッシュパターン	2-23
表 2.2-5 試験区間形成試験パターン	2-24
表 2.2-6 排水側の置換時間と圧力損失抵抗および区間容積	2-31
表 2.2-7 試験材料とその材質	2-33
表 2.2-8 使用機器及び器具	2-35
表 2.2-9 試験結果一覧	2-36
表 2.2-10 CS 吸着試験結果	2-37
表 2.2-11 SR 吸着試験結果	2-37
表 2.2-12 NA 吸着試験結果	2-38
表 2.3-1 MENSOR 社製 CPT6000 の主な仕様	2-39
表 2.3-2 表示計および信号変換器の主な仕様	2-40
表 2.3-3 接続ケーブル一覧	2-41
表 2.3-4 設定値一覧	2-44
表 2.3-5 CPT6000 用ノイズ対策済み接続ケーブル一覧	2-48
表 2.3-6 各圧力段階における計測圧力	2-54
表 2.3-7 設定圧力と各圧力計出力値の差	2-55
表 2.4-1 ケーシング内容積測定結果	2-61
表 2.4-2 耐圧性能確認試験結果一覧	2-62
表 2.4-3 濃度分散低減効果確認試験結果(平均)	2-77

3 章 表 目 次

表 3.1-1 分析試料一覧	3-1
----------------	-----

表 3.3-1	主要成分の分析結果 (ME-XRF06)	-----	3-4
表 3.3-2	微量成分の分析結果 (ME-MS61)	(1/4) -----	3-5
表 3.3-2	微量成分の分析結果 (ME-MS61)	(2/4) -----	3-5
表 3.3-2	微量成分の分析結果 (ME-MS61)	(3/4) -----	3-5
表 3.3-2	微量成分の分析結果 (ME-MS61)	(4/4) -----	3-5
表 3.3-3	微量成分の分析結果 (ME-MS81)	(1/3) -----	3-6
表 3.3-3	微量成分の分析結果 (ME-MS81)	(2/3) -----	3-6
表 3.3-3	微量成分の分析結果 (ME-MS81)	(3/3) -----	3-6
表 3.3-4	試料の希土類元素濃度 (単位は ppm)	-----	3-8
表 3.4.1-1	比表面積測定結果	-----	3-9
表 3.4.2-1	間隙分布 (細孔分布) の測定結果	-----	3-10

4 章 表 目 次

表 4.3.1-1	試験に用いた鋼管の諸元	-----	4-9
表 4.3.1-2	管径が一定の条件での鋼管試験結果	-----	4-12
表 4.3.1-3	高粘性流体注入試験による鋼管管径の推定結果	-----	4-14
表 4.3.1-4	1/8' +1/8+1/8' (各 4m) の場合の管径の評価結果	-----	4-17
表 4.3.1-5	1/8' +1/8+1/8' (各 4m) の場合の管径の評価結果のまとめ	-----	4-17
表 4.3.1-6	3/16+1/8+1/8' (各 4m) の場合の管径の評価結果	-----	4-18
表 4.3.1-7	3/16+1/8+1/8' (各 4m) の場合の管径の評価結果のまとめ	-----	4-18
表 4.3.1-8	1/8' +1/8+1/8' +1/8+1/8' +1/8(各 2m) の場合の管径の評価結果	-----	4-19
表 4.3.1-9	1/8' +1/8+1/8' +1/8+1/8' +1/8(各 2m) の場合の管径の評価結果のまとめ	-----	4-19
表 4.3.1-10	3/16+1/8+1/8' +3/16+1/8+1/8' (各 2m) の場合の管径の評価結果	-----	4-20
表 4.3.1-11	3/16+1/8+1/8' +3/16+1/8+1/8' (各 2m) の場合の管径の評価結果のまとめ	-----	4-20
表 4.3.2-1	高粘性流体の広がりによる評価結果の変化	-----	4-24
表 4.3.2-2	軸対称割れ目モデルでの試験結果	-----	4-30
表 4.3.2-3	割れ目幅が変化する場合の実験結果	-----	4-36
表 4.4.2-1	高粘性流体の注入条件	-----	4-45
表 4.4.2-2	解析モデルの諸物性	-----	4-45

5 章 表 目 次

表 5.2.2-1	フレネルボリュームの幅	-----	5-6
-----------	-------------	-------	-----

表 5.3.1-1	センサーの仕様	5-11
表 5.3.2-1	実験ケース	5-15
表 5.3.3-1	グリムゼルテストサイト計測孔座標	5-50
表 5.3.3-2	グリムゼルテストサイト 計測断面仕様	5-52
表 5.3.3-3	グリムゼルテストサイト 発振・受信位置(2008 年)	5-52
表 5.3.3-4	グリムゼルテストサイト 発振・受信位置(2009 年)	5-53
表 5.3.3-5	グリムゼルテストサイト 波形読取り結果および 3 次元解析入力値の例	5-58

6 章 表 目 次

表 6.2.2-1	ボーリング孔の幾何データ	6-8
表 6.3.4-1	レジン注入の手順 (その 1)	6-17
表 6.3.4-2	レジン注入の手順 (その 2)	6-18
表 6.3.5-1	イソパノール(ISOPROPANOL)およびレジン (RESIN INJECSION-26) の注入量	6-21
表 6.4-1	C-FRS11.001~C-C-FRS.005 孔の座標および方向	6-22
表 6.8.1-1	薄片作成数量一覧	6-56

7 章 表 目 次

表 7.1-1	分析試料一覧	7-2
表 7.3-1	主要成分の分析結果 (ME-XRF06)	7-5
表 7.3-2	微量成分の分析結果 (ME-MS61) (1/4)	7-6
表 7.3-2	微量成分の分析結果 (ME-MS61) (2/4)	7-6
表 7.3-2	微量成分の分析結果 (ME-MS61) (3/4)	7-7
表 7.3-2	微量成分の分析結果 (ME-MS61) (4/4)	7-7
表 7.3-3	微量成分の分析結果 (ME-MS81) (1/3)	7-8
表 7.3-3	微量成分の分析結果 (ME-MS81) (2/3)	7-8
表 7.3-3	微量成分の分析結果 (ME-MS81) (3/3)	7-9
表 7.3-4	マトリクス試料の希土類元素濃度 (単位は ppm)	7-10
表 7.4-1	鉱物分析試料一覧	7-14
表 7.4.2-1	鉱物分析試料一覧	7-16
表 7.5-1	物性試験試料一覧	7-17
表 7.5.1-1	試験前のコアの形状、体積、重量	7-18
表 7.5.1-2	試験後のコアの形状、体積、重量	7-18

表 7.5.1-3	コアの間隙率	7-19
表 7.5.2-1	比表面積測定結果	7-20
表 7.5.2-2	比表面積測定結果（乾燥前、乾燥後、測定後）	7-20
表 7.6.2-1	測定装置および薬品	7-27
表 7.6.2-2	分析装置の構成	7-27
表 7.6.3-1	測定元素および分析方法	7-30
表 7.6.3-2	分析結果	7-31
表 7.6.3-3	陽イオン交換容量	7-31

1. 研究概要

1.1 本研究の背景

高レベル放射性廃棄物を地層処分する際の天然バリアの性能評価においては、人工バリアから漏出した放射性核種が地下水を輸送媒体として生物圏へ移行するといういわゆる「地下水シナリオ」が、重要なシナリオとなる。そのため、処分施設建設地点の岩盤における地下水溶質の移行特性を精度良く把握することが重要となる。

岩盤中での地下水溶質の移行特性を直接的に測定する手法として、トレーサ物質を含む溶液を岩盤に投入し、岩盤内でのトレーサの移行量および移行速度を計測するトレーサ試験がある。わが国においては、従来非収着性のトレーサ物質を用いた試験研究はわずかながら行われている（熊田他、1986；池川 他、1996；動力炉・核燃料開発事業団、1998）。しかし、収着性を有するトレーサ物質を使用したトレーサ試験が原位置の岩盤を対象として実施された例は、海外では若干あるものの、わが国ではほとんどない。そのため、特に収着性物質の岩盤中での移行特性を精度良く把握するためのトレーサ試験技術およびその評価技術を開発しておく必要がある。

また、亀裂を有する岩盤においては、地下水は岩石基質部に比べて透水性の高い割れ目を主に選択的に流れていく。そのような岩盤中での溶質の移行には、割れ目や岩石基質部の様々な幾何形状・化学特性が関与している。これらの特性値のうち、特に割れ目の幾何形状に関しては、トレーサ試験の結果を解釈する上で不可欠なものである。そこで、トレーサ試験を補完するために、割れ目の分布や開口幅、割れ目内での流動形態等を推定する技術の開発も必要である。

1.2 目的

本研究においては、高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価に資するため、岩盤中での特に割れ目を介した溶質移行特性を高精度に調査・評価する技術の確立を図る。

1.3 全体計画

1.3.1 研究の内容

本研究においては、割れ目を含む数mスケールの岩盤を対象として、①溶質の移行を直接的に測定するトレーサ試験・評価技術、それを補完する技術として、②Rn 濃度計測による割れ目開口幅の調査技術、③高粘性流体の注入による割れ目内での流動形態に関する調査技術、④物理探査による割れ目の分布に関する調査技術を開発・高度化する。なお、トレーサ試験技術では、従来の非収着性トレーサに加えて収着性トレーサについても扱える試験装置を開発する。

上記の調査・評価技術について、以下の手順により研究開発を進める。

(1) 現状技術の調査

現状技術の調査を行い、開発や高度化が必要な項目の抽出を行う。

(2) 試験装置の試作

トレーサ試験装置と、割れ目の分布・幾何形状等を推定するための各種調査技術の原位置試験装置を試作する。

(3) 試験手法の検討

上記の各種調査技術について、室内試験や数値シミュレーションにより、対象岩盤の水理特性や割れ目特性に応じた最適な試験条件等の検討を行う。

(4) 評価手法の開発

試験結果を基に、岩盤中での特に割れ目を介した溶質移行特性（割れ目の開口幅、広がり・分布、割れ目内での分散長、岩石基質部への拡散・分配係数等）を推定する手法の開発を行う。

(5) 原位置への適用

本研究において開発した試験装置、調査・評価手法を、原位置での単一の割れ目を対象とした数mスケールの試験に適用し、有効性の確認を行う。また、その結果に基づいて、岩盤中での特に割れ目を介した溶質移行特性の調査・評価手法について、とりまとめを行う。

1.3.2 研究工程

研究期間は、平成17年度より平成24年度の8ヵ年とする。研究工程を表1.3.2-1に示す。

表 1.3.2-1 研究工程

実施項目	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24
(1)現状技術の調査	□ ■							
(2)試験装置の試作	□ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ □
(3)試験手法の検討	□ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ □
(4)評価手法の開発		■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	□ □	■ ■
(5)原位置への適用			□ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■

注) ■は実施、□は不実施を表す

1.4 本年度の実施概要

1.4.1 トレーサ試験技術の開発

原位置トレーサ試験技術について、以下の項目を実施する。

(1) トレーサ試験装置の試作

トレーサ試験装置の孔内装置の耐圧性を向上させるための改良に着手する。

1.4.2 各種割れ目探査技術の開発

トレーサ試験技術を補完する各種割れ目探査技術について、以下の項目を実施する。

(1) ラドン濃度計測による割れ目開口幅調査技術

岩石試料を用いた室内試験により、割れ目充填物の特性とラドン発生量の関係を明らかにし、ラドン濃度計測結果への割れ目充填物の影響を推定する。

(2) 高粘性流体の注入による割れ目内での流動形態調査技術

室内において開口幅を変えた模擬割れ目を対象とした高粘性流体注入試験を実施し、試験データの蓄積を図る。また、高粘性流体注入試験の数値シミュレーションを実施し、割れ目の不均質性が注入圧力の変化に与える影響を確認する。

(3) 物理探査による割れ目分布調査技術

様々な条件の割れ目に対処できるように、開口割れ目や鉱物で充填された割れ目などを含む岩石ブロックを用いて、音響トモグラフィ法の3次元測定を行い、割れ目の検出精度を比較・検討する。

1.4.3 原位置での実証

原位置での実証について、以下の項目を実施する。

(1) 国外の適用性試験場での各技術の有効性評価

昨年度までに実施したスイス Grimsel Test Site での原位置実証試験の2条の対象割れ目に樹脂を注入する。そして、今年度は深度の浅い方の割れ目についてボーリング孔を掘削し、高精度のボアホール TV カメラ等により樹脂の充填状況を確認する。この樹脂注入試験の結果と、本調査で開発したトレーサ試験や各種割れ目探査技術により推定された割れ目特性とを比較・検討する。

(2) 国内適用性試験場の地質環境の調査

物質が移動する経路となる割れ目の分類に関する検討を行うために、昨年度日本国内の地下坑道における調査孔掘削により取得した岩石コア試料を用いて、割れ目や充填鉱物の詳細な分析を行う。

参考文献

池川洋二郎 他(1996)：液体トレーサーによる不連続性岩盤中の浸透経路評価、電力中央研究所我孫子研究所報告、U96006.

熊田政弘 他(1986)：花崗岩岩盤中における原位置試験、日本原子力研究所、JAERI-M 86-044.

動力炉・核燃料開発事業団(1998)：釜石鉾山における非収着性トレーサー試験研究、PNC TJ1205-98-001.

2. 原位置トレーサ試験装置の試作

2.1 はじめに

原位置トレーサ試験装置は、原位置で掘削されたボーリング孔間でのトレーサの移動速度を計測し、地層処分の安全評価上重要となる割れ目の物質移動に関する情報を取得するための装置である。本トレーサ試験装置は表 2.1-1 で示す4種類の試験およびトレーサ材の選定による非収着／収着試験を実施できることを目標として開発を進めている。

本章では、国内調査での適用試験に向けたトレーサ注入部用圧力計の耐圧向上と試験区間へのトレーサ置換向上のため注入部の形状等を目的とする試作を実施した。

次ページに試験装置の構成図を示す。

表 2.1-1 トレーサ試験方法

試験名	ボーリング孔構成	方法	目的
ポイント希釈試験	単孔	試験区間内にトレーサを注水し、試験区間内のトレーサ濃度の減少傾向を測定する	試験区間内を通過する地下水流量の算定
単孔注水揚水試験	単孔	試験区間内にトレーサを注水した後揚水し、揚水される地下水中のトレーサ濃度を連続的に測定する	移流、分散、拡散、収着に関するパラメータの算定
放射状収束試験	注水孔 揚水孔	注水孔から場を乱さないようにトレーサを投入し、揚水孔から揚水を行い、揚水される地下水中のトレーサ濃度を連続的に測定する	移流、分散、拡散、収着に関するパラメータの算定
ダイポール試験	注水孔 揚水孔	注水孔からトレーサを注水し、揚水孔から揚水を行い、揚水される地下水中のトレーサ濃度を連続的に測定する	移流、分散、拡散、収着に関するパラメータの算定

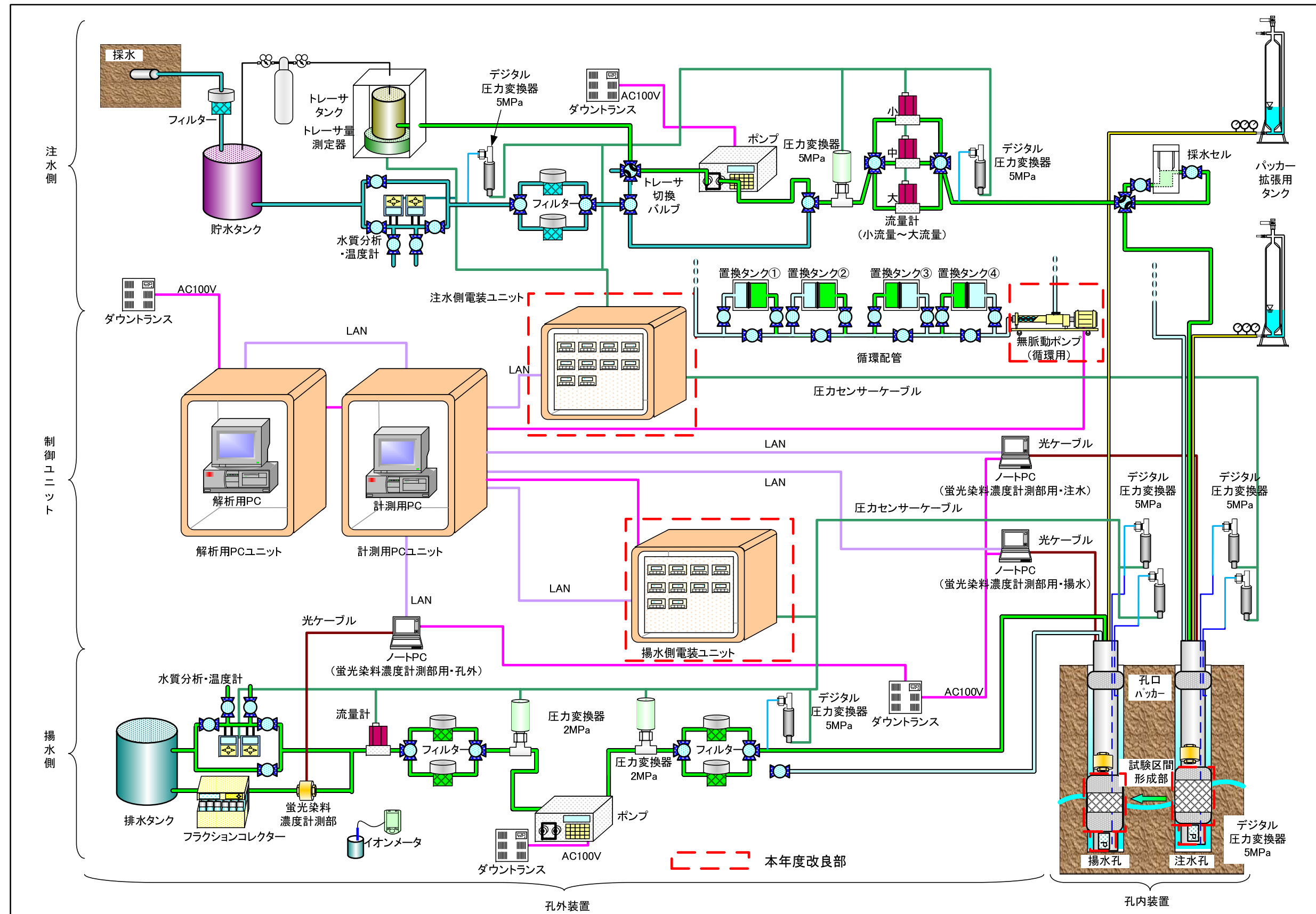


図 2.1-1 試験装置概念図

2.2 耐圧型トレーサ注水部・揚水部の試作

2.2.1 仕様

前年度までの注水部・揚水部の形状では試験区間でトレーサを置換するのに時間を要したことから、試験区間の形状を変更しトレーサ注入時の置換時間を短縮できる構造の試験区間を試作した。

仕様を以下に示す。

- ・外径：78mm 以内
- ・全長：2000mm 以内
- ・構造：パッカー中心に軸対面型のポートを備える(図 2.2-1 参照)

<その他>

- ・パッカーラバーの交換を容易にする構造
- ・試験区間形成にメッシュ等の材料を使用し試験区間長を容易に変更可能
- ・孔径が拡大している深度でトレーサ注入部を形成するパッカーを拡張した場合、パッカーラバーが異常拡張し破損することが、H22 年度の高粘性流体注入装置（同構造のパッカー）で発生した。よって、トレーサ注入部を形成するパッカー部にプロテクターを取り付け、パッカーラバーの異常拡張を防止する機能を設ける。

2.2.2 パッカー一体型トレーサ試験形成装置の構造

試作した試験区間形状は、高粘性流体試験装置で実績のある遮水パッカー部中央にパッカーの拡張に連動して稼働する注入、排水ポートをパッカー軸に対し対面になるように配置した。従来型の試験区間形成と本年度試作した試験区間形状を概念図として図 2.2-1 と図 2.2-2 パッカー一体型トレーサ試験区間形成装置の構造図に示し、設計図面を図 2.2-3 に示す。

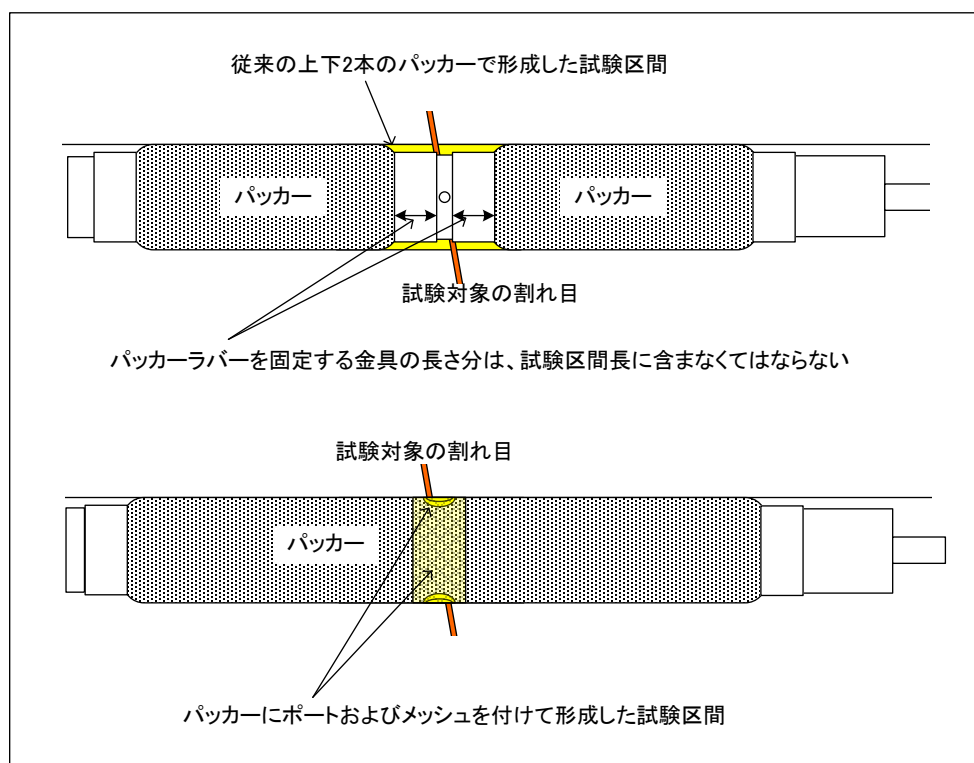


図 2.2-1 従来型の試験区間形成と本年度試作した試験区間形状を概念図

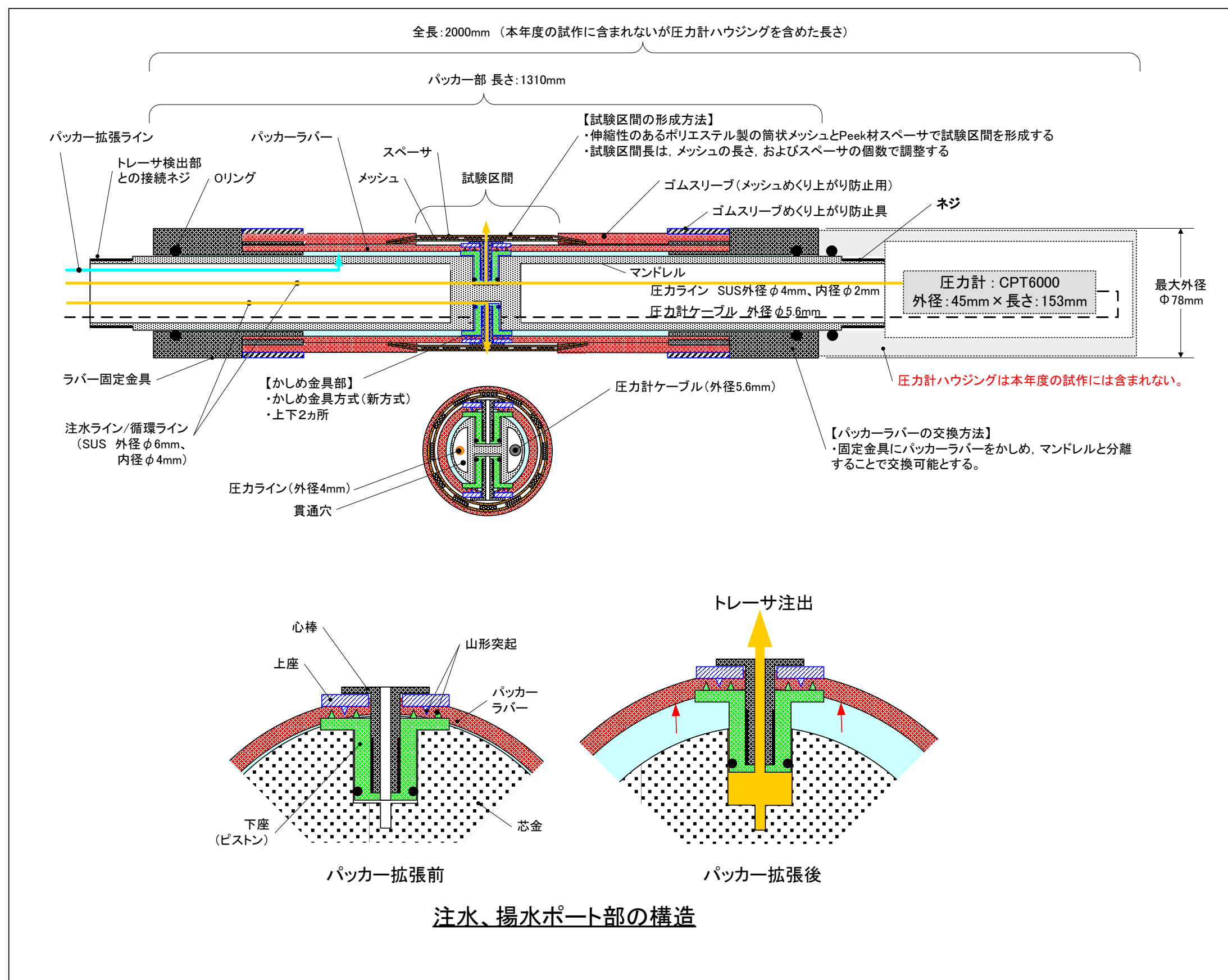


図 2. 2-2 パッカー一体型トレーサ試験区間形成装置の構造図

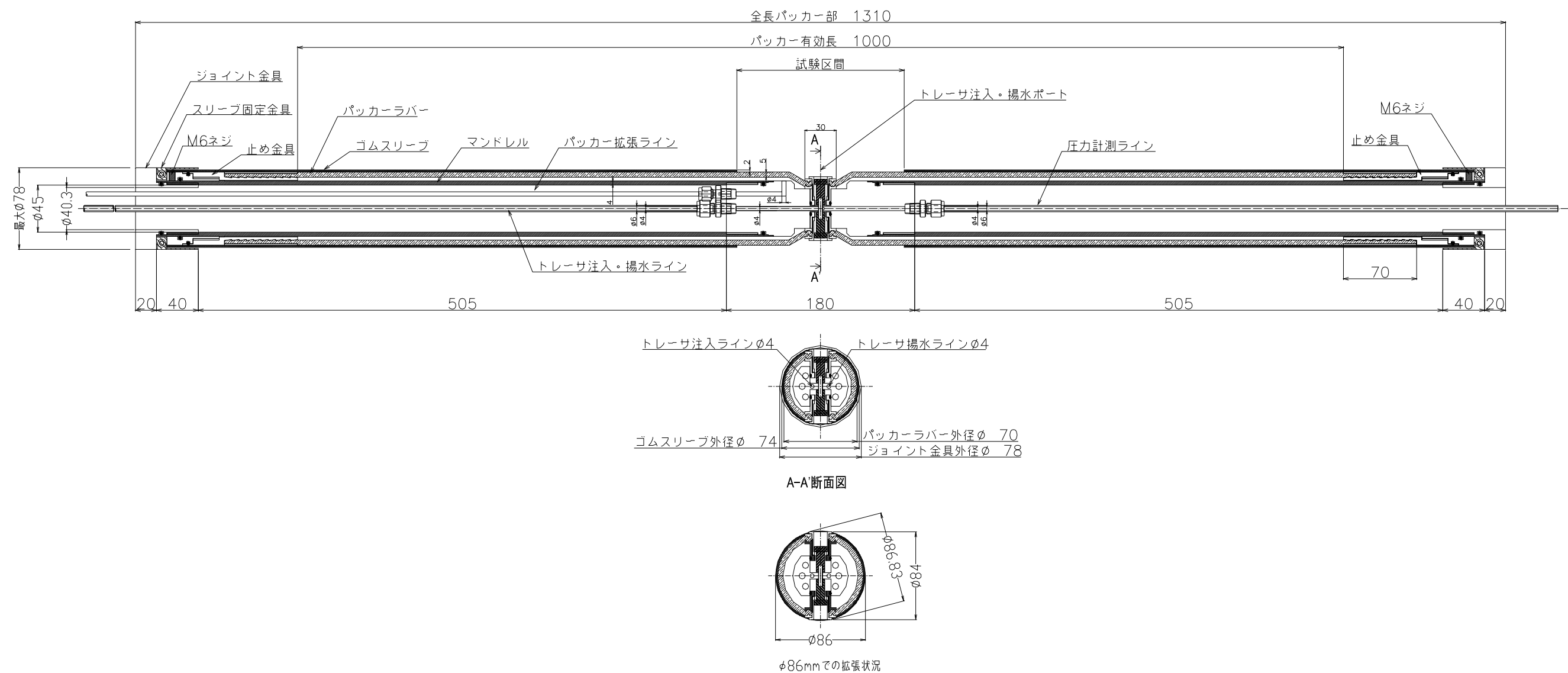


図 2.2-3 パッカー一体型トレーサ試験区間形成装置の設計図面

2.2.2.1 パッカー部構造の変更

従来方式のパッカー部を図 2.2-4 に示す。

パッカー部の構造は、パッカーラバーを直接金属スリーブでマンドレルにかしめ固定する構造で、パッカーラバーが破損した場合、パッカーラバーをマンドレルから外す事ができず容易に交換することができなかった。そこで本年度は、パッカーラバーが破損した場合、パッカーラバーの交換が容易にできる構造に変更した。



図 2.2-4 従来方式のパッカー部

図 2.2-5 に変更したパッカー部の構造図を示す。パッカーラバーのかしめ部は、ジョイント金具、スリーブ固定金具、マンドレル、止め金具、パッカーラバーから構成される。

パッカーラバーは、止め金具に金属スリーブでかしめ、止め金具は、マンドレルに M6 ネジで固定する。この構造によりマンドレルからジョイント金具・スリーブ固定金具・M6 ネジを外すことでマンドレルからパッカーラバーを外すことができ、パッカーラバーの交換を可能とした。

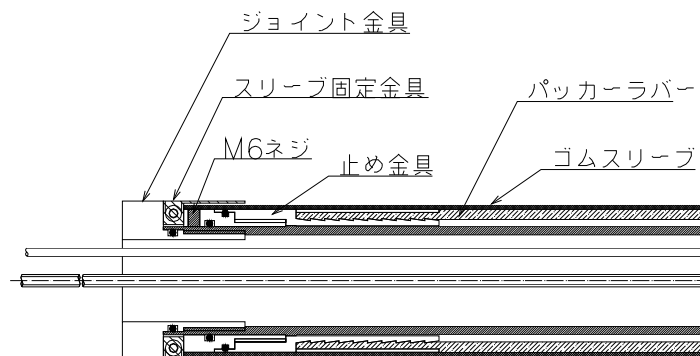


図 2.2-5 変更したパッカー部構造図

図 2.2-6 に試作したパッカー部，図 2.2-7 にパッカーラバーを止め金具に金属スリーブでかしめた状況を示す。



図 2.2-6 試作したパッカー部



図 2.2-7 パッカーラバー

2.2.2.2 試験区間形成方法の変更

従来方式の試験区間形成方法を、図 2.2-8 に示す。

試験区間の形成方法は、パッカーラバー固定金具の長さが試験区間に含まれ試験区間容積が大きくなり試験区間内のトレーサ置換に時間を要した。また、試験区間は、パッカーラバーの固定金具で形成する構造のため、試験区間の長さを変更できず、試験区間の容積を小さくすることができなかった。

そこで本年度は、試験区間の長さを任意で変更でき、試験区間の容積を試験対象の割れ目にあった試験区間を設けられる構造に変更した。

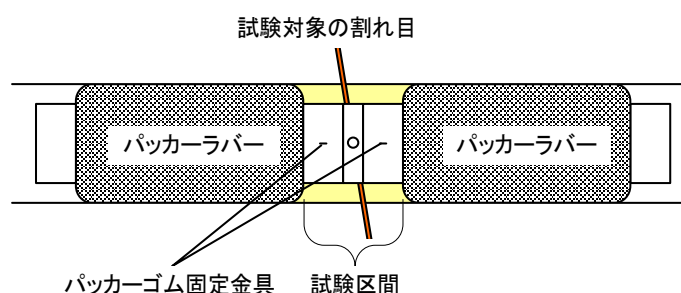


図 2.2-8 従来方式の試験区間

図 2.2-9 に変更した試験区間の形成方法、図 2.2-10 にポート付きパッカー構成図を示す。

試験区間を形成する方法は、平成 20 年に試作した高粘性流体試験装置と同様にパッカーラバーに直接注水・揚水ポートを取り付けたパッカー一体構造とした。

しかし、ポート付きパッカーが形成する試験区間は点となるため、岩盤の割れ目全週を試験区間にするためには、円筒形の試験区間を形成する必要がある。そこで、試験区間に伸縮性のあるポリエステル製の筒状のメッシュ生地をポートの周りに被せる方法に変更した。さらに試験区間のメッシュ部の透水性を向上させるために、伸縮性のあるポリエステル製の筒状のメッシュ生地と Peek 材のスペーサをポートの周りに被せる方法を採用し、メッシュ長とスペーサの数を変更することで試験区間長を容易に変更可能な構造とした。図 2.2-11 に変更した試験区間の形成状況写真を示す。パッカーラバーにメッシュを被せ（右図）、スペーサをポリエステルメッシュに縫い付ける形で固定し、その上から更にメッシュを 3 層被せスペーサを保護し、4 層の構造とした（左図）。図 2.2-12 に試験区間を形成した断面図を示す。

メッシュは、メッシュの両端をパッカーラバーとスリーブで挟み込み、スリーブの端は、平成 20 年に試作した高粘性流体試験装置と同様に 2 つ割のスリーブ固定金具で挟み込み固定する構造とした。

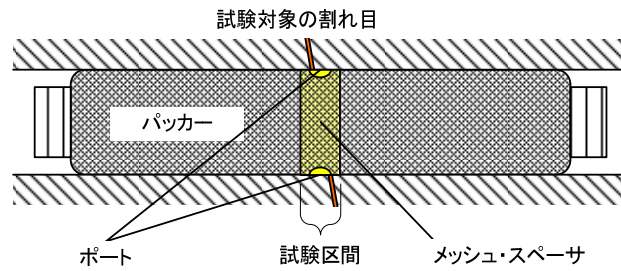


図 2. 2-9 変更した試験区間の形成方法

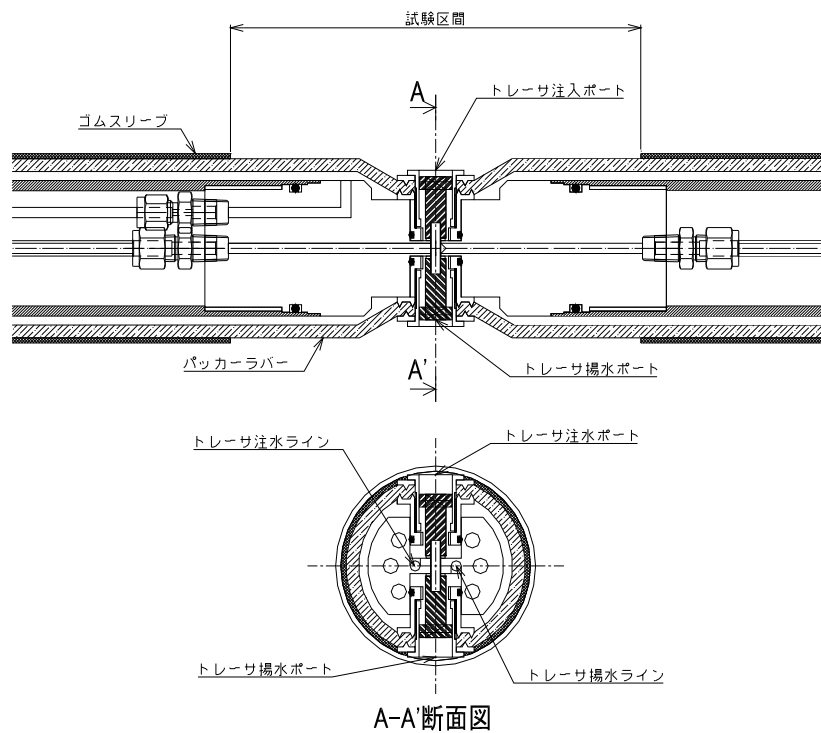


図 2. 2-10 ポート付きパッカー構成図

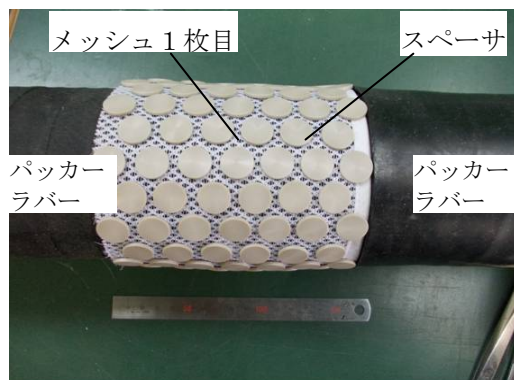


図 2. 2-11 変更した試験区間形成状況

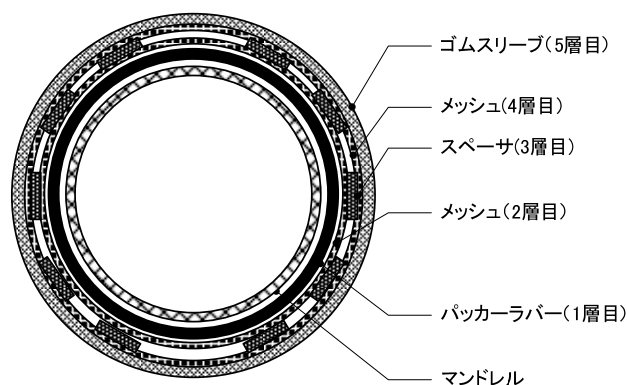


図 2.2-12 変更した試験区間断面図

2.2.2.3 孔径拡大時のパッカーラバー異常拡張防止構造

H21 年度の高粘性流体注水装置（同構造のパッカー）で孔径が拡大している深度でトレーサ注水部を形成するパッカーラバーを拡張し、パッカーラバーが異常拡張し破損した。

本年度は、パッカーラバーの異常拡張を防止するために、孔径拡大していると想定されるパッカーラバー側面に金属プレートを装着し、ラバーゴムの拡張を制御し、孔径拡大部のパッカーラバーの異常拡張を防止する構造とした。

図 2.2-13 にパッカーラバーの異常拡張を防止する金属プレートを装着したパッカー部の構造図を示す。

金属プレートは、ピストン部用とパッカーラバー部用の幅の異なる 2 種類のプレートを準備し、孔径拡大の状況に合わせ使用する幅と使用枚数を決定する。金属プレートの取り付け方法は、スペーサとメッシュで試験区間を成形した後、孔径拡大していると想定されるパッカーラバーの側面にゴムスリーブで金属プレート固定する。次にパッカー拡張時に金属プレートが動かないように、スリーブ固定金具でゴムスリーブ・金属プレート・パッカーラバーを挟み込み固定する。図 2.2-14 にパッカーラバー異常拡張防止のイメージ図を示す。また、表 2.2-1 に製作した金属プレートの使用表、図 2.2-15 に製作した金属プレートを装着した試験区間部の写真を示す。

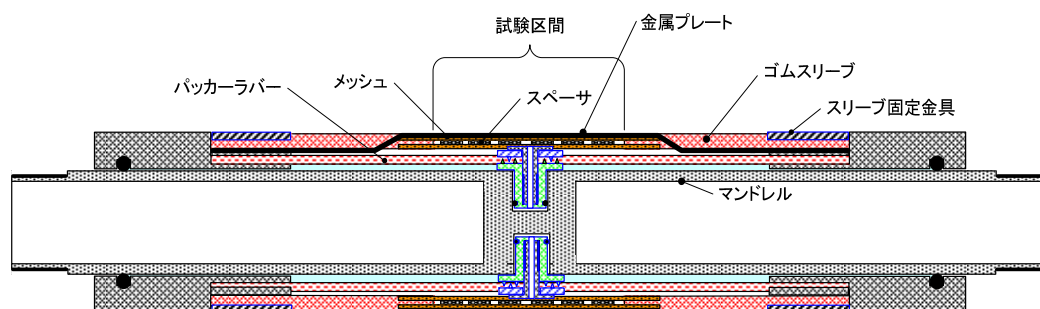


図 2.2-13 パッカーラバー異常拡張防止構造図

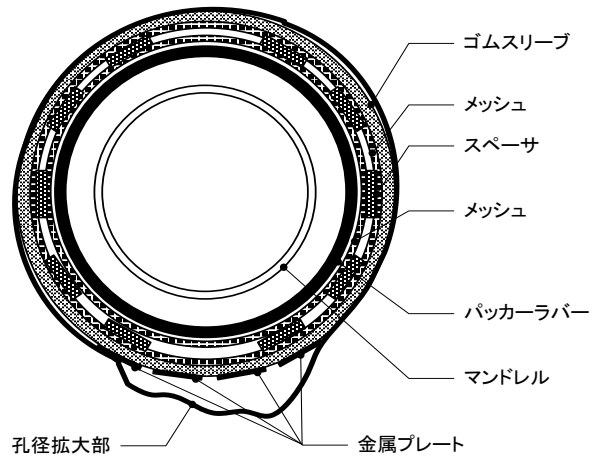


図 2.2-14 孔径拡大時のパッカーラバー異常拡張防止イメージ図

表 2.2-1 製作した金属プレート仕様表

厚み (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	製作枚数	材質	備 考
1.0	40	1250	1	ステンレス鋼	ピストン部用
	10		6		パッカーラバー部用
0.5	40		1		ピストン部用
	10		6		パッカーラバー部用



図 2.2-15 金属プレートを装着した試験区間部

2.2.2.4 トレーサ注水・揚水部の形状検討

H20 年度の高粘性流体注水装置（同構造のパッカー）のトレーサ注水の構造を図 2.2-16、図 2.2-17 に示す。従来方式のトレーサ注水ポートは、ワッシャー、固定ナット、固定ボルト、ピストンで構成されるが、パッカーマンドレル(中心軸部)の円周に合わせて曲率をとっていたため、パッカーラバーが接触するピストンと固定ナットの接触面が少なく固定しにくかった。また、固定ナットを回転させパッカーラバーを挟み固定する時に、パッカーラバーが固定ナットと一緒に回転することによりパッ

カーラバーが振れ固定ナットとピストン部との密着性が低下し、しばしば、パッカー拡張圧力の低下の原因となっていた。

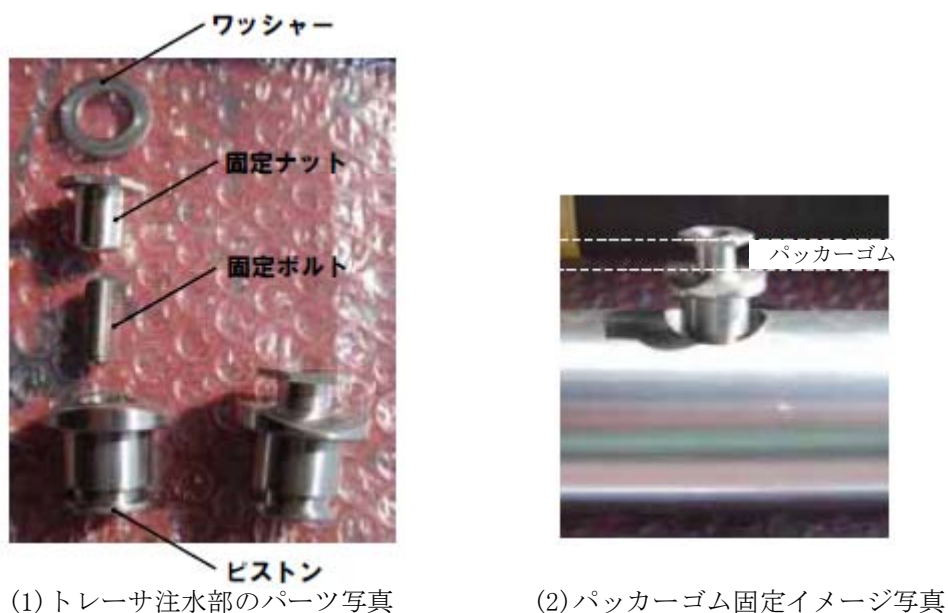


図 2.2-16 従来方式のトレーサ注水部写真

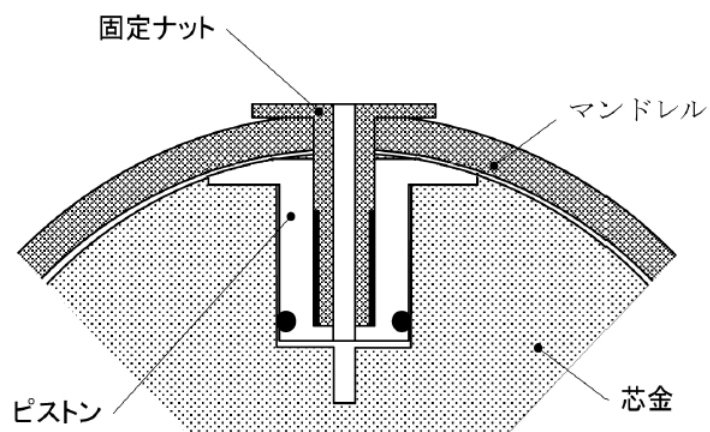


図 2.2-17 従来方式のトレーサ注水構造図（断面図）

本年度は、パッカーラバーの拘束力を向上させるため、パッカーラバーの接触面の形状・構造について検討を行いトレーサ注水・揚水部を試作した。図 2.3-18 に形状を変更したトレーサ注水・揚水部の構造図を示す。

図 2.2-18、図 2.2-19 に示すように、パッカーラバーの拘束力を向上させるために、かしめ座金・ピストンのパッカー接触面に山形の突起部を設けた。さらに固定ナットとかしめ座金を分割し、固定ナットを回転させても、パッカーラバーが振れない構造とすることとした。図 2.2-20、図 2.2-21 にパッ

カーラバーを装着していないトレーサ注水・揚水部を示す。

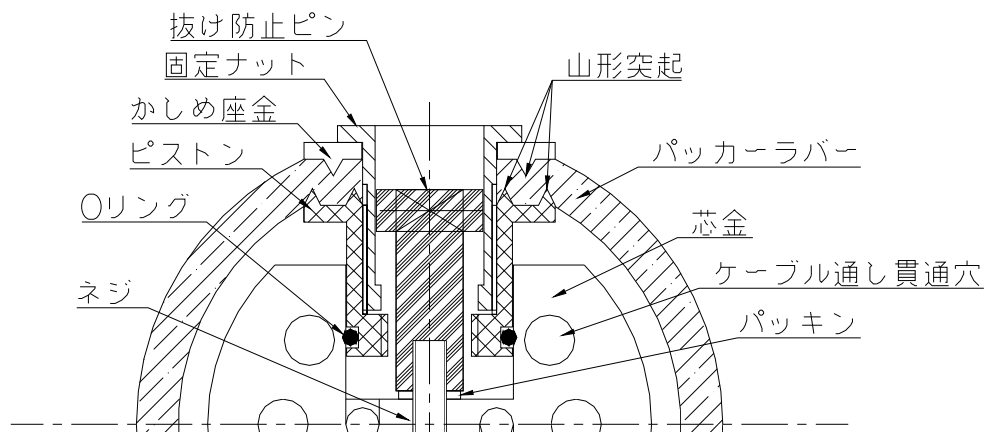


図 2.2-18 変更したトレーサ注水・揚水部構造図（断面図）



図 2.2-19 試作したトレーサ注水・揚水部のパーツ



図 2.2-20 試作したトレーサ注水・揚水部（パッカー拡張時の作動状況）



図 2.2-21 試作したトレーサ注水・揚水部（パッカー収縮時の作動状況）

2.2.3 パッカー一体型トレーサ試験形成装置の性能確認試験

試作した耐圧型トレーサ注水・揚水部に関する以下の4つの試験を実施し各部の耐圧と構造に関する性能を確認した。

- 配管系の耐圧性能確認試験
- ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験
- パッカー拡張試験
- パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験

下記に各試験の詳細を示す。

2.2.3.1 配管系の耐圧性能確認試験

試作した耐圧型トレーサ注水・揚水部の揚水ライン・注水ライン・圧力計測ラインの配管について耐圧性能確認試験を実施した。試験条件は 5MPa で 30 分とし、配管の接続箇所等から漏洩および変形等の異常がないことを確認する。耐圧性能確認試験の概略をを図 2.2-22 に示す。

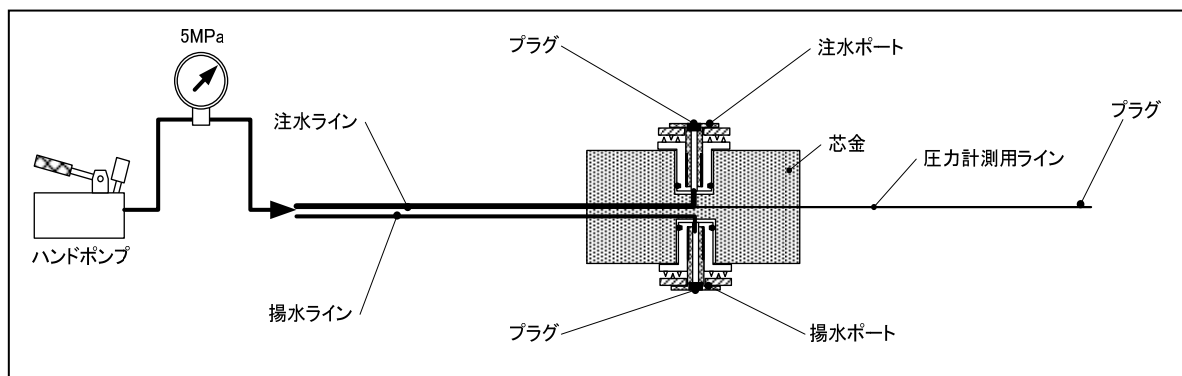


図 2.2-22 耐圧性能確認試験概略図

配管の耐圧性能確認試験手順を以下に示す。

- ① 配管にテストポンプを取り付ける
- ② テストポンプを用いてポートおよび配管に送水する
- ③ 配管内のエア抜き終了後、ポートおよび圧力計側ラインにプラグを取り付け、万力でプラグを固定する
- ④ テストポンプにより、配管内の水圧を 5MPa まで注水し、ラインを閉鎖する
- ⑤ 30 分以上放置し、配管内の水圧に顕著な低下の無いことを確認する。また、目視確認により配管接続部からの水漏れの無いことを確認する
- ⑥ 試験終了後、配管に変形等の異常が無いことを確認する

表 2.2-2 に耐圧性能確認試験結果の一覧を示し、図 2.3-23、図 2.3-24 に耐圧試験状況を示す。

各配管接続部およびポート部に、耐圧試験中の漏洩および耐圧試験後の変形は認められず、耐圧試験に合格と判断する。

表 2.2-2 耐圧性能確認試験結果一覧

ユニット名	配管名	漏れの有無 (目視確認)	外観 (試験終了後)	検査結果
トレーサ注水用 パッカー部	注水ライン	無	異常無し	合格
	揚水ライン	無	異常無し	合格
	圧力計測ライン	無	異常無し	合格
トレーサ揚水用 パッカー部	注水ライン	無	異常無し	合格
	揚水ライン	無	異常無し	合格
	圧力計測ライン	無	異常無し	合格

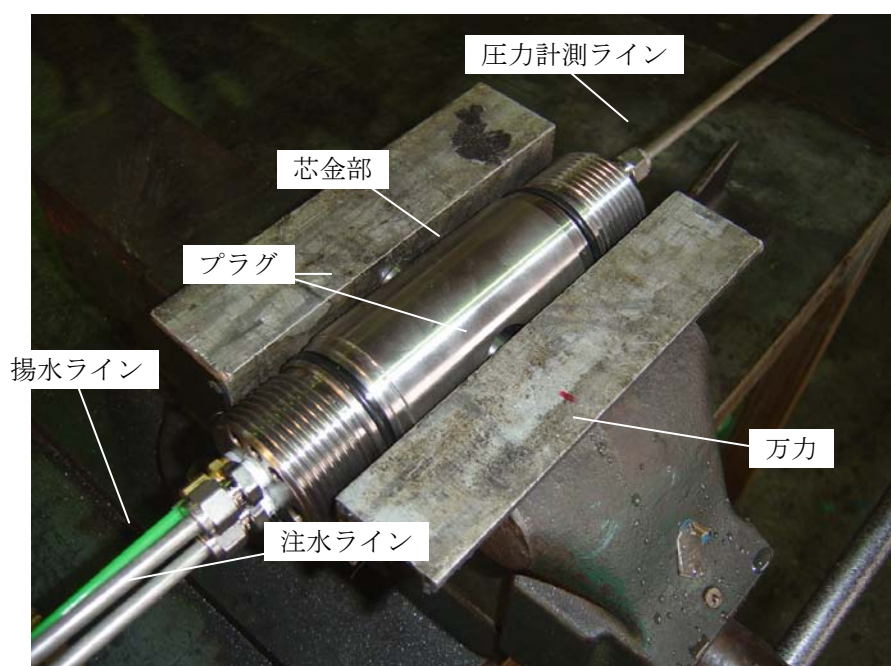


図 2.2-23 耐圧試験状況（芯金部）

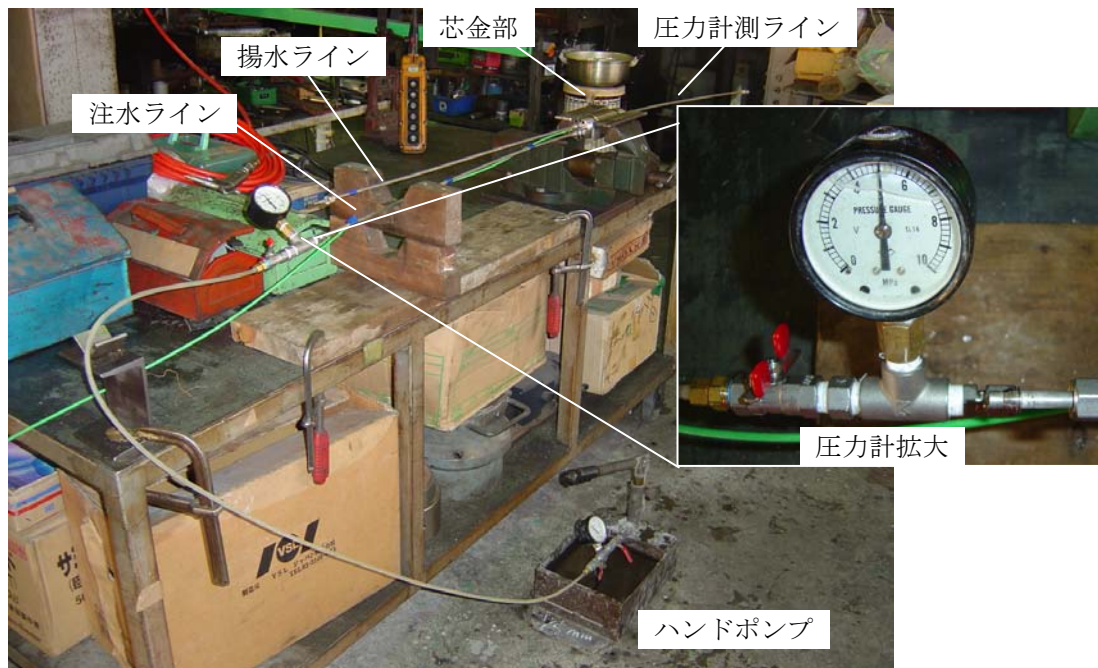


図 2.2-24 耐圧試験状況（全景）

2.2.3.2 ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験

ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験を実施した。図 2.2-25 にピストン抜け防止構造図を示す。試験条件はパッカーを 1.5MPa で拡張し、トレーサ注水ラインに 0.5MPa の水压を加え、トレーサ注入ラインからネジ部を介しトレーサ揚水ポートに圧力が漏洩していないかを圧力計で確認した。トレーサ注入ラインの試験終了後、同様にトレーサ揚水ラインの耐圧性能確認試験を実施した。

ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験の概略を図 2.2-26 に示す。

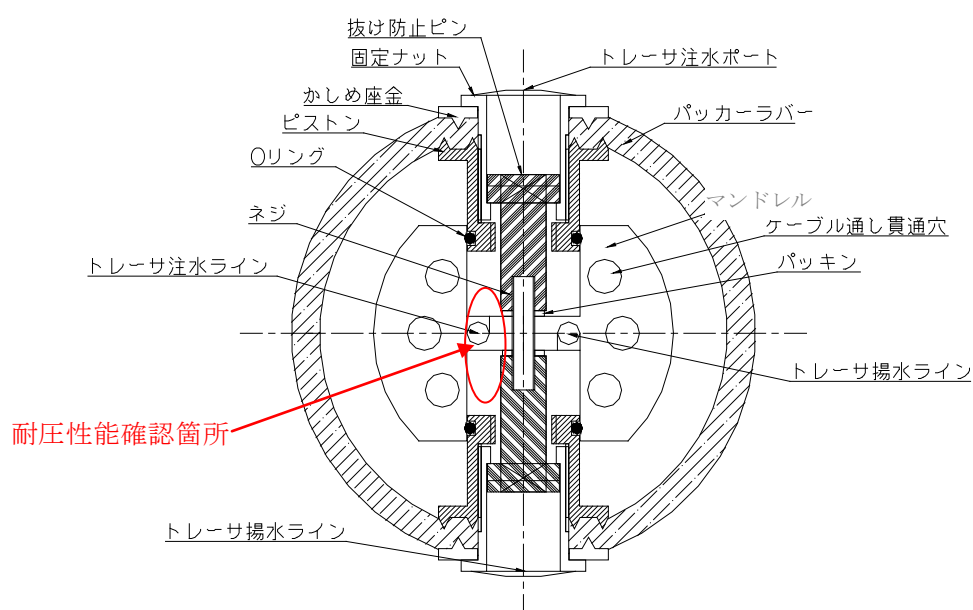


図 2.2-25 ピストン抜け防止構造図

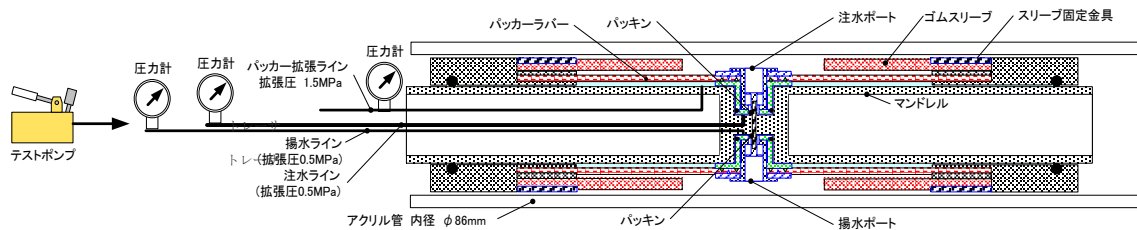


図 2.2-26 ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験概略図

ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認の試験手順を以下に示す。

- ① アクリル管内にパッカーを設置する。使用するアクリル管は試験孔径に準じ、内径 $\phi 86\text{mm}$ とする
- ② パッカーに配管を取り付ける
- ③ テストポンプでパッカーを加圧・拡張する
- ④ パッカーおよび配管内のエア抜きを行った後、1.5MPa まで加圧し、ラインを閉鎖する
- ⑤ パッカー圧の低下がないことを確認し、トレーサ注入ラインをテストポンプで 0.5MPa まで加圧・拡張する
- ⑥ 24 時間以上放置し、パッカー圧 (1.5MPa) およびトレーサ注入ライン圧 (0.5MPa) の過度な圧力低下が認められないことを確認する
- ⑦ トレーサ注入ラインの試験終了後、同様にトレーサ揚水ラインの耐圧性能確認を実施する

図 2.2-27 にピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認状況を示す。図 2.2-28、図 2.2-29 に拡張試験の結果を示す。試験の結果、トレーサ注水・揚水ラインともに外気温による圧力の変動が認められる箇所もあるが試験終了までの長時間 (35 時間以上) 過度な圧力低下は認められず、耐圧性能確認試験に合格と判断する。



図 2.2-27 耐圧性能確認状況

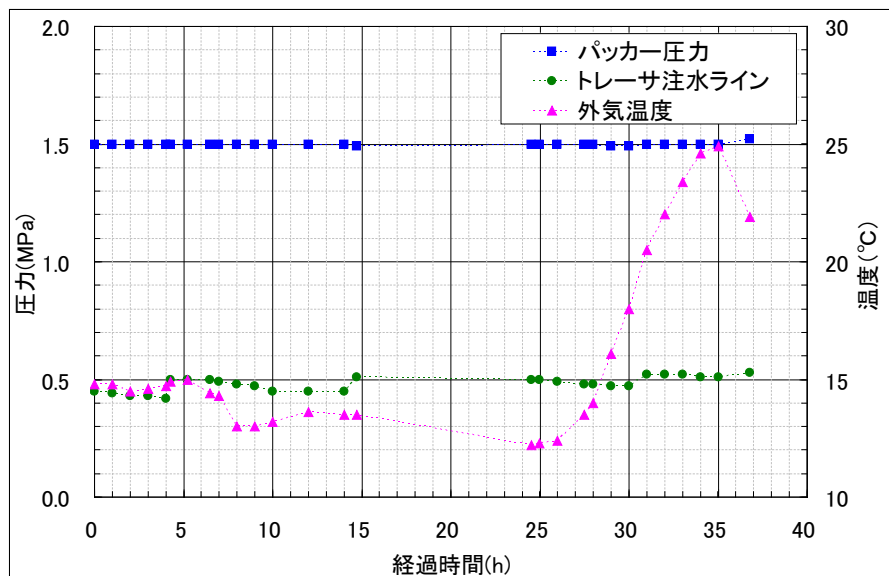


図 2.2-28 ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験結果（トレーサ注水ライン加圧時）

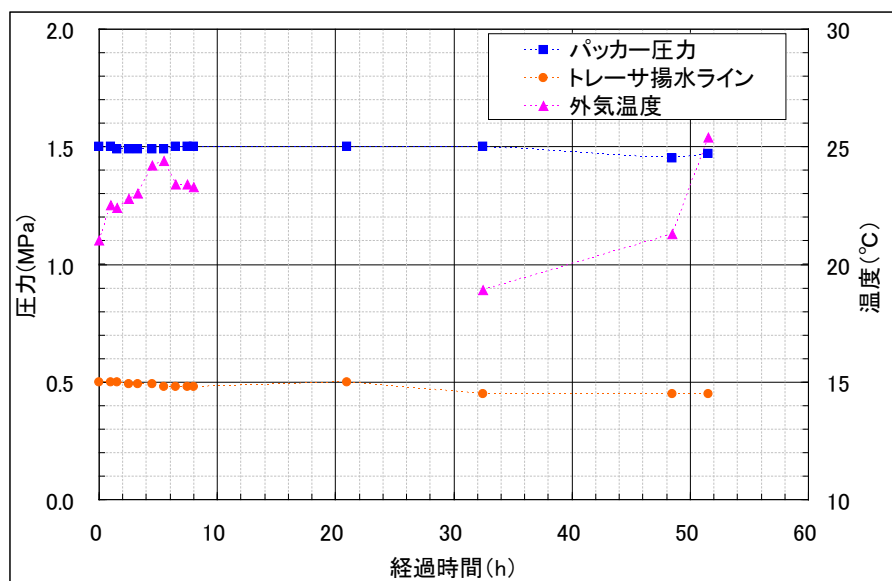


図 2.2-29 ピストン抜け防止構造部の耐圧性能確認試験結果（トレーサ揚水ライン加圧時）

2.2.3.3 パッカー拡張試験

トレーサ注水・揚水部のパッカーについてアクリル管内で加圧・拡張試験を行い、パッカー性能を確認した。パッカー拡張試験は 1.5MPa で 30 分間実施し、エアの漏れおよび変形等の異常がないことを確認する。また、メッシュとスペーサで試験区間が形成されることを確認する。

パッカー拡張試験手順を以下に示し、にパッカー拡張試験の概略を図 2.2-30 に示す。

- ① アクリル管内にパッカーを設置する。使用するアクリル管は試験孔径に準じ、内径 $\phi 86\text{mm}$ とする
- ② パッカーに配管を取り付ける
- ③ パッカーを拡張する。拡張はコンプレッサを用いて行う
- ④ パッカー内のエア抜きを行った後、コンプレッサを用いて 1.5MPa まで拡張し、ラインを閉鎖する
- ⑤ ブルドン管式圧力計にてパッカー拡張圧力 (1.5MPa) を確認する
- ⑥ 30 分以上放置して、パッカー拡張圧力の過剰な低下が認められないことおよび、パッカー端部・配管・トレーサ注水ポート (かしめ部) 周辺でのエア漏れの無いことを確認する
- ⑦ パッカーを収縮してアクリル管からパッカーを取出し、収縮後のラバーの異常変形等の無いことを確認する

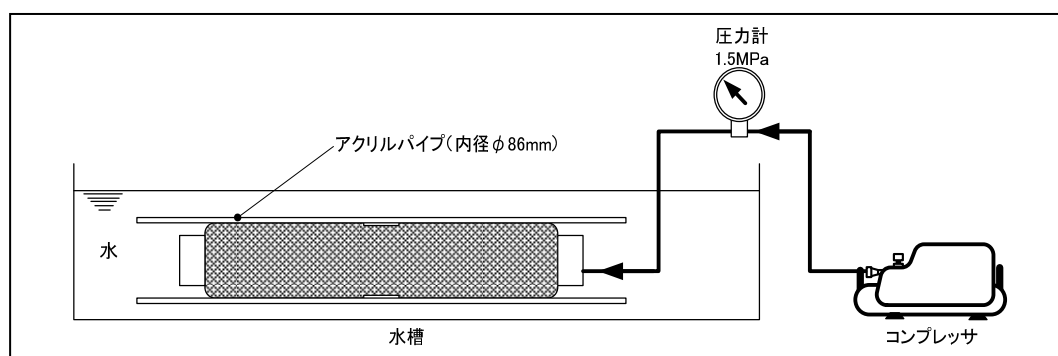


図 2.2-30 パッカー拡張試験概略図

表 2.2-3 に拡張試験結果の一覧を示し、図 2.2-31 にパッカー拡張試験状況を示す。試作したトレーサ注水・揚水部 2 台ともに、拡張試験中の漏洩および拡張試験後の変形は認められず、拡張試験に合格したと判断した。

表 2.2-3 耐圧性能確認試験結果一覧

ユニット名	漏れの有無 (目視確認)	外観 (試験終了後)	検査結果
トレーサ注水用パッカー部	無	異常無し	合格
トレーサ揚水用パッカー部	無	異常無し	合格



図 2.2-31 パッカー拡張試験状況

また、試験区間の形成状況を確認するため、メッシュおよびスペーサで幅 100mm の試験区間を形成し、アクリル内でパッカーを拡張後、試験区間にウラニンを注水し形成状況を確認した。

図 2.2-32 に試験区間の形成状況写真を示す。写真からメッシュとスペーサで形成された試験区間にウラニンは全体に均等に拡がり、またパッカーラバー部には拡がらないことが確認できる。このことからトレーサ注入部の試験区間として問題がないことを確認した。



図 2.2-32 試験区間の形成状況（左写真：試験区間形成無し、右写真：試験区間形成有り）

2.2.3.4 パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験

パッカーラバーの異常拡張防止構造について、孔径が拡大したボーリング孔を模擬した鋼管内でパッカーラバーの加圧・拡張を行い、パッカーラバー異常拡張防止構造の性能を確認した。パッカーは1.5MPaで加圧・拡張し、金属プレートの変形状況を目視で確認する。なお、孔径が拡大したボーリング孔を模擬するために鋼管の中央部に穴を設け、性能確認試験を実施した。図2.2-33にパッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験の概略図、図2.2-34に性能を確認するために使用した孔径拡大したボーリング孔を模擬した鋼管を示す。

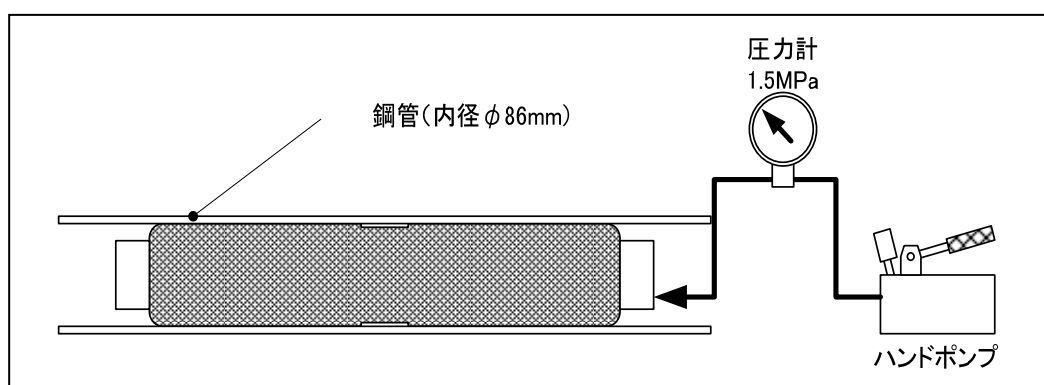


図 2.2-33 パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験概略図

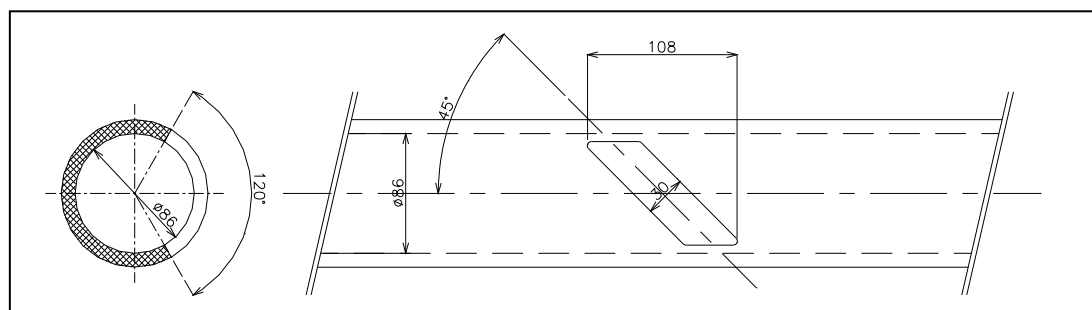


図 2.2-34 孔径拡大したボーリング孔を模擬したアクリル管

パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験の手順を以下に示す。

- ① パッカーに金属プレートを装着する（厚さ 0.5 と 1.0mm）
- ② 鋼管内にパッカーを設置する（内径 $\phi 85\text{mm}$ ）
- ③ テストポンプでパッカーを加圧・拡張する
- ④ パッカーおよび配管内のエア抜きを行った後、ハンドポンプで 1.5MPa まで加圧・拡張し、ラインを閉鎖する
- ⑤ 圧力計にてパッカー拡張圧力（1.5MPa）を確認する
- ⑥ 孔径拡大部周辺での漏洩およびラバーの異常変形の無いことを確認する

- ⑦ パッカーを収縮して鋼管からパッカーを取出し、収縮後のラバーおよび金属プレートの異常変形等を確認する

図 2.2-35、図 2.2-36 にパッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験状況を示す。パッカー拡張試験中の漏洩およびパッカーラバーの異常変形は認められず、金属プレートを利用したパッカーラバー異常拡張防止構造が有効であることを確認した。また、0.5mm厚さの金属プレートは 1.0mm厚さの比べ大きく変形したものの、パッカーを収縮することにより鋼管内から容易に回収することが可能であることを確認した。金属プレートの厚さは 1.0mmも 0.5mmも装置への装着性に差が無いことから、変形量の少ない 1.0mm厚さを採用することが望ましい。



図 2.2-35 パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験状況
(厚み:0.5mm、左図:ピストン部 右図:パッカーラバー部)



図 2.2-36 パッカーラバー異常拡張防止構造の性能確認試験状況
(厚み:1.0mm、左図:ピストン部 右図:パッカーラバー部)

2.2.2.5 トレーサの置換に関する室内実験

パッカー一体型トレーサ試験装置は、図 2.2-10 で示すようにパッカー軸に対して対称にポート部を配している。1つのポート部が作る試験区間は約 1.0cc（図 2.2-32 左側参照）でボーリング孔内の割れ目部全周をカバーすることはできない。このため、孔壁全周に対して試験区間および任意の試験区間長を形成させるために、パッカーの拡張に応じて変形できる収縮性のあるポリエステル製メッシュと試験区間の隙間を確保するための Peek 材によるスペーサーを組み合わせた部材をパッカー中央部のポートに被せる方法を採用（図 2.2-11 参照）した。

本室内試験は、試験区間形成部の透水性を確保し且つトレーサの置換性能を向上させるために Peek 材によるスペーサーの大きさ、厚さ、および配列パターンを変えて最適なメッシュ形状を検討した。

試験区間形成部の組合せは、入手可能な Peek 材の寸法で且つ円周状に均等配置ができる形状の中から計算上圧力損失抵抗が最小となる、メッシュパターン M1、M2、M3（図 2.2-37 および表 2.2-4 参照）を用いた。また実験では、表 2.2-5 で示す注入流量を 150cc/min、100cc/min、50cc/min の 3 段階に変えた試験パターン 9 通りで実施した。

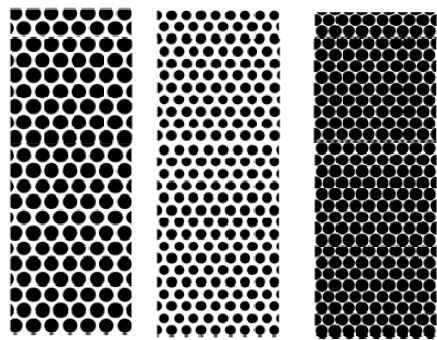


図 2.2-37 Peek 材スペーサの配置パターン（左：M1、中：M2、右：M3）

表 2.2-4 メッシュパターン

メッシュパターン			
共通部	ポリエステルメッシュ #5500		
	内側1枚+Peek+外側2枚		
	Peek材	Peek材間隔	Peek 材の占有面積比率
M1	外径12mm、厚さ1.5mm	3mm	49.44%
M2	外径8mm、厚さ1.5mm	4mm	41.78%
M3	外径10mm、厚さ1.0mm	1mm	65.31%

表 2.2-5 試験区間形成試験パターン

試験パターン	メッシュパターン	流量
パターン 1	M1	150cc/min
パターン 2		100cc/min
パターン 3		50cc/min
パターン 4	M2	150cc/min
パターン 5		100cc/min
パターン 6		50cc/min
パターン 7	M3	150cc/min
パターン 8		100cc/min
パターン 9		50cc/min

試験区間の形成方法は、図 2.2-38 に示すようにポリエステルメッシュ #5500 に Peek 材を張り付けた筒状のメッシュを注水ポートが中心に来るよう被せて、第 1 層目と 2 層目とする。第 3 層目としてその上に同じ長さのポリエステルメッシュ #5500 を被せ、更に第 4 層目として長さが前後 2.5cm 長いポリエステルメッシュ #5500 を被せる。この第 4 層目のメッシュの両端は、メッシュ部のずれを防止するためのゴムスリーブで固定させて、試験区間とした。

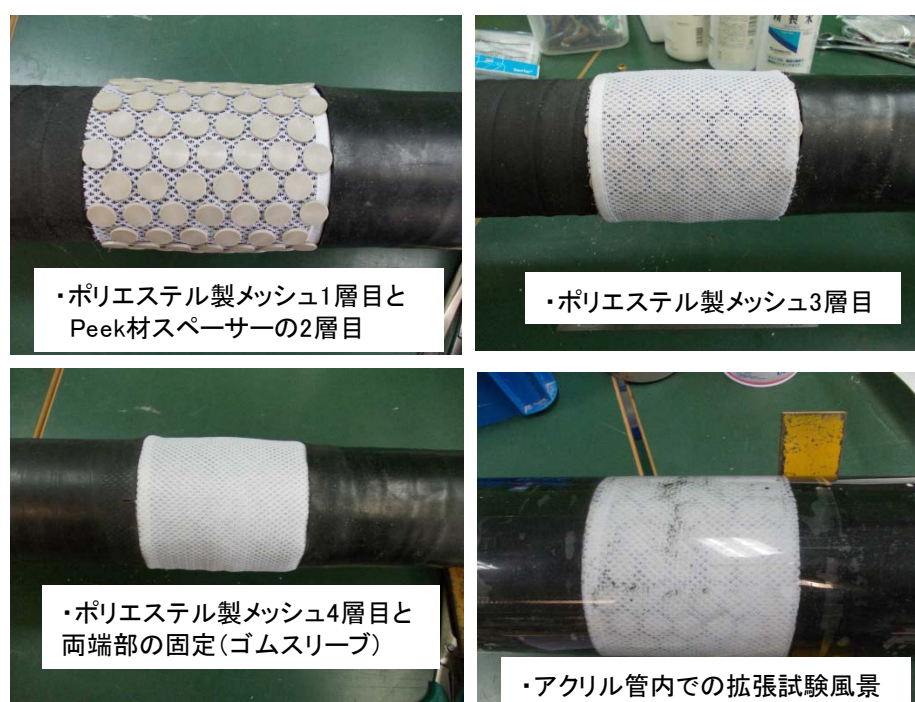


図 2.2-38 試験区間の形成例：メッシュパターン M1

各パターンのスペーサ配置の状態を図 2.2-39 に示す。

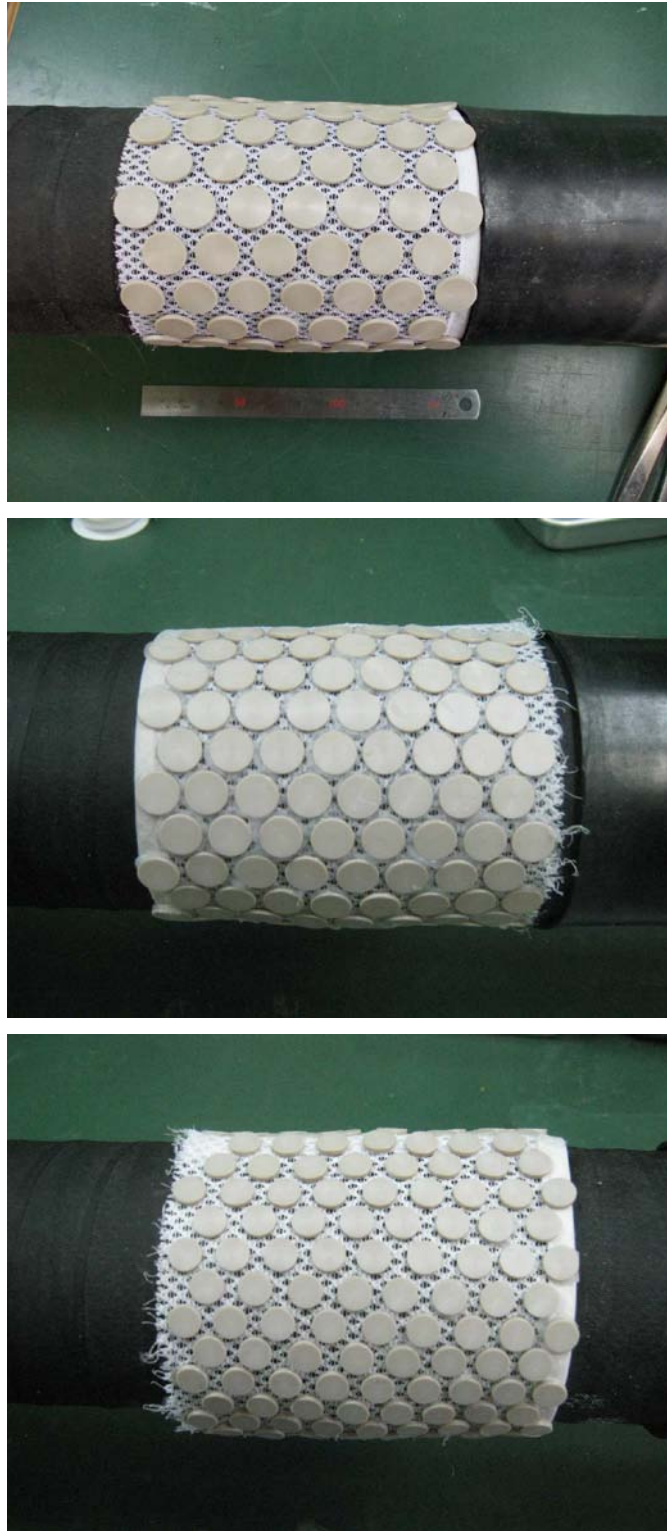


図 2.2-39 スペーサの配置状態（上から 12mm、10mm、8mm）

試験区間形成の最適な組み合わせを求める試験は、図 2.2-40 および図 2.2-41、図 2.2-42 で示す試験装置で実施した。

試験方法を以下に示す。

- ① 全系統の配管および試験区間を水で満たす。
- ② 注水側、排水側の電気伝導度計（EC メーター）の値がそろった状態から、注水ラインの水をトレーサ溶液（NaCl 濃度 0.1%：電気伝導度率約 2.23ms/cm）に切り替えると同時に上流側 EC メーター後のバルブを開き上流側の EC 値が一定になるまで排水する。
- ③ 上流側の EC 値が一定になったことを確認後、先のバルブを送水側に切り替え、注水側、排水側の電気伝導度、圧力計、流量の経時変化を記録する。
- ④ 排水側の電気伝導度が注水側の値とほぼ同一で安定したことを確認したら試験を終了する。
- ⑤ データを整理し、試験区間のトレーサ溶液の置換状態および圧力損失を求め最適な組み合わせを求める。

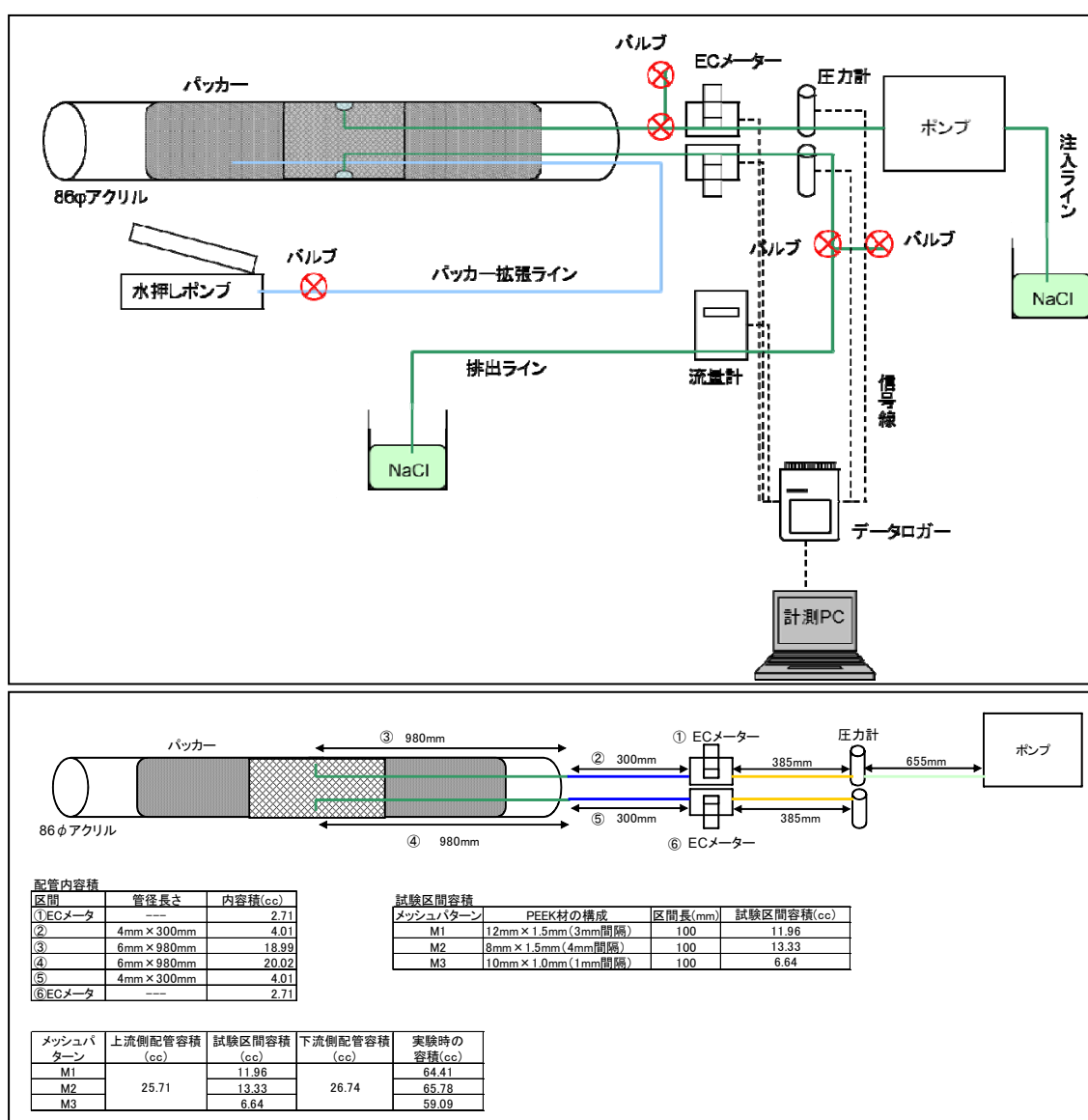


図 2.2-40 実験装置概念図および配管内容積



図 2.2-41 実験風景 1



図 2.2-42 実験風景 2

図 2.2-43、図 2.2-44、図 2.2-45 に流量毎の試験パターンにおける電気伝導度変化と圧力変化図を示す。

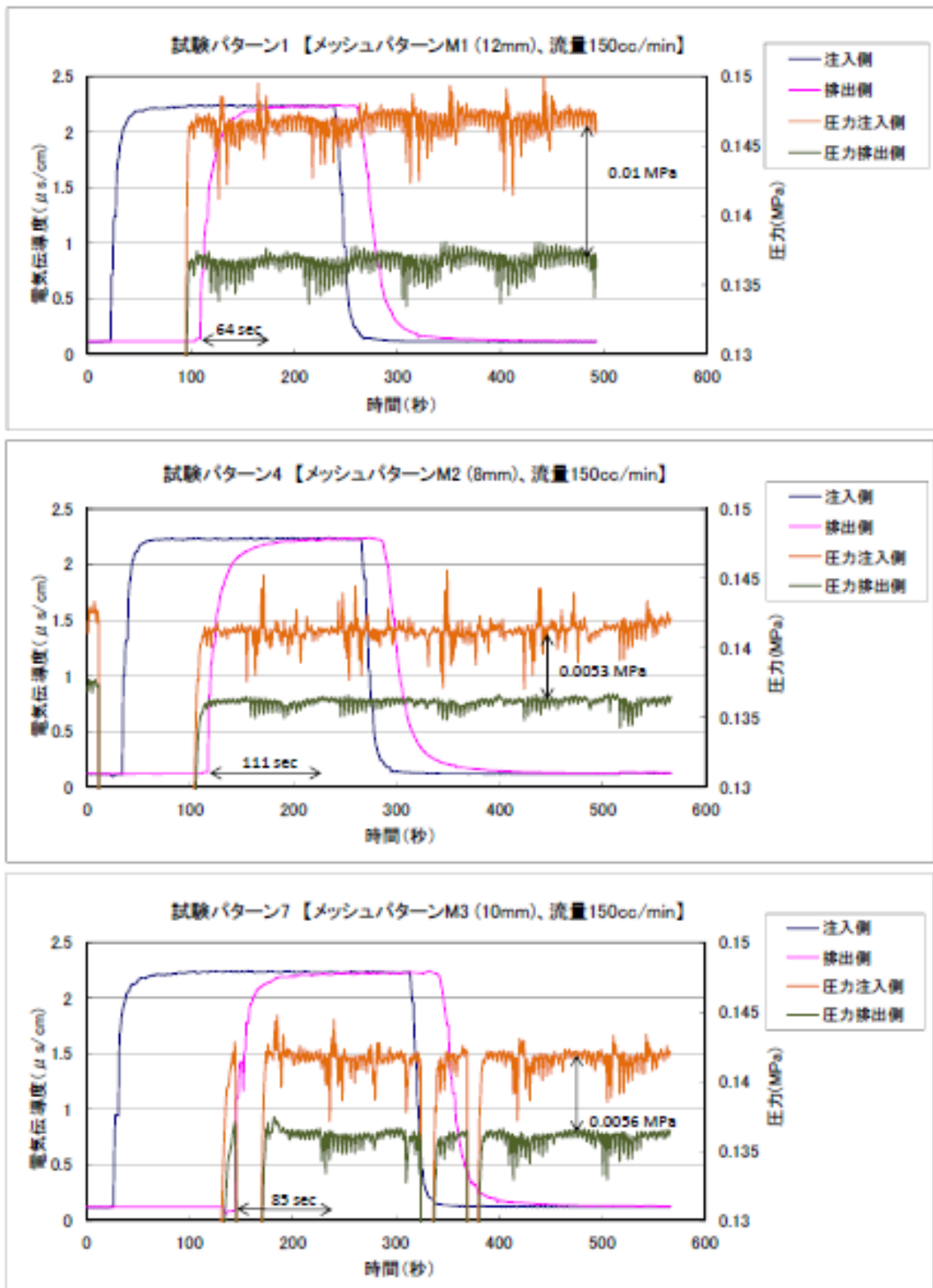


図 2.2-43 流量 150cc/min 時の試験パターン 1、4、7

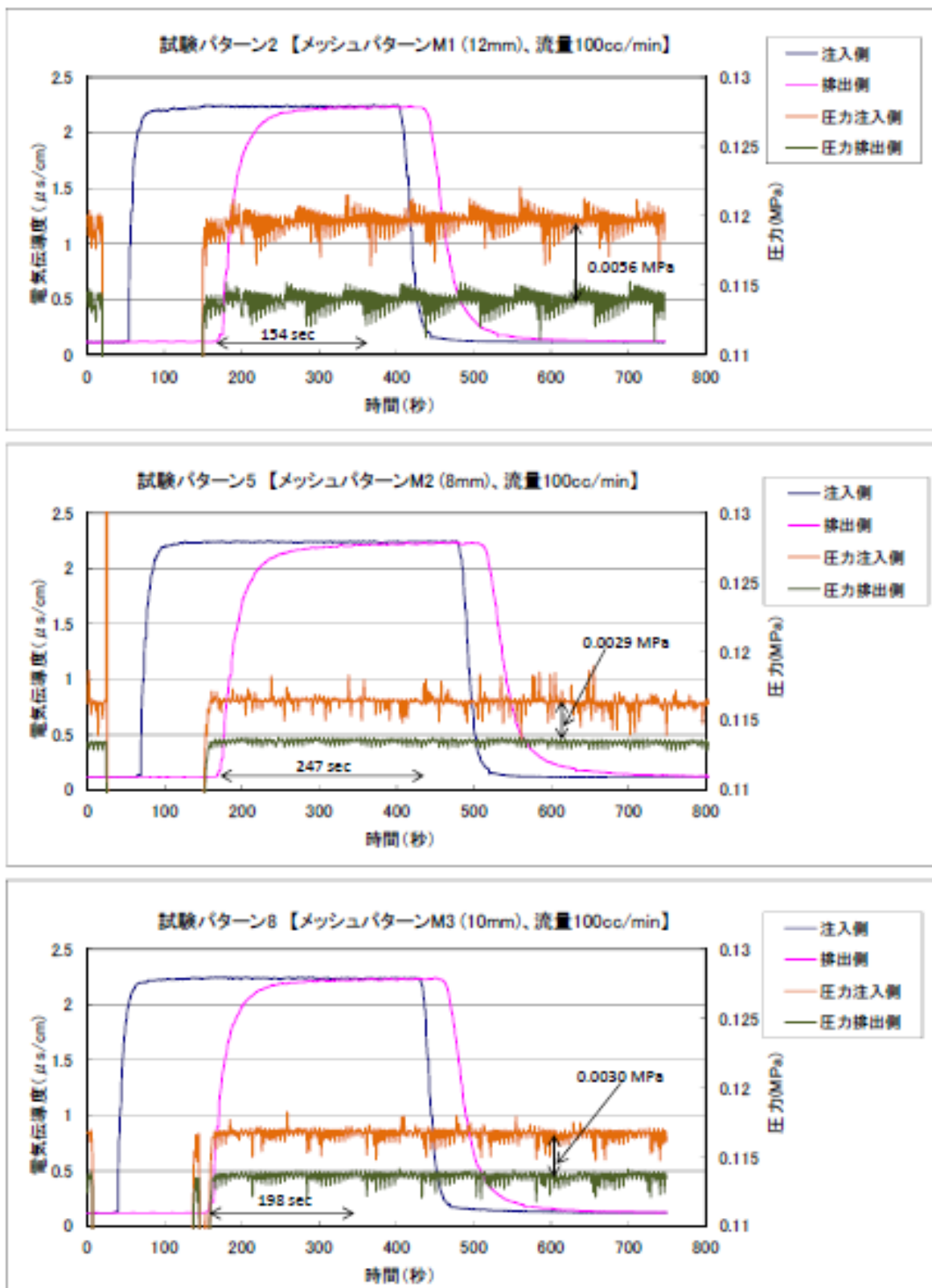


図 2.2-44 流量 100cc/min 時の試験パターン 2、5、8

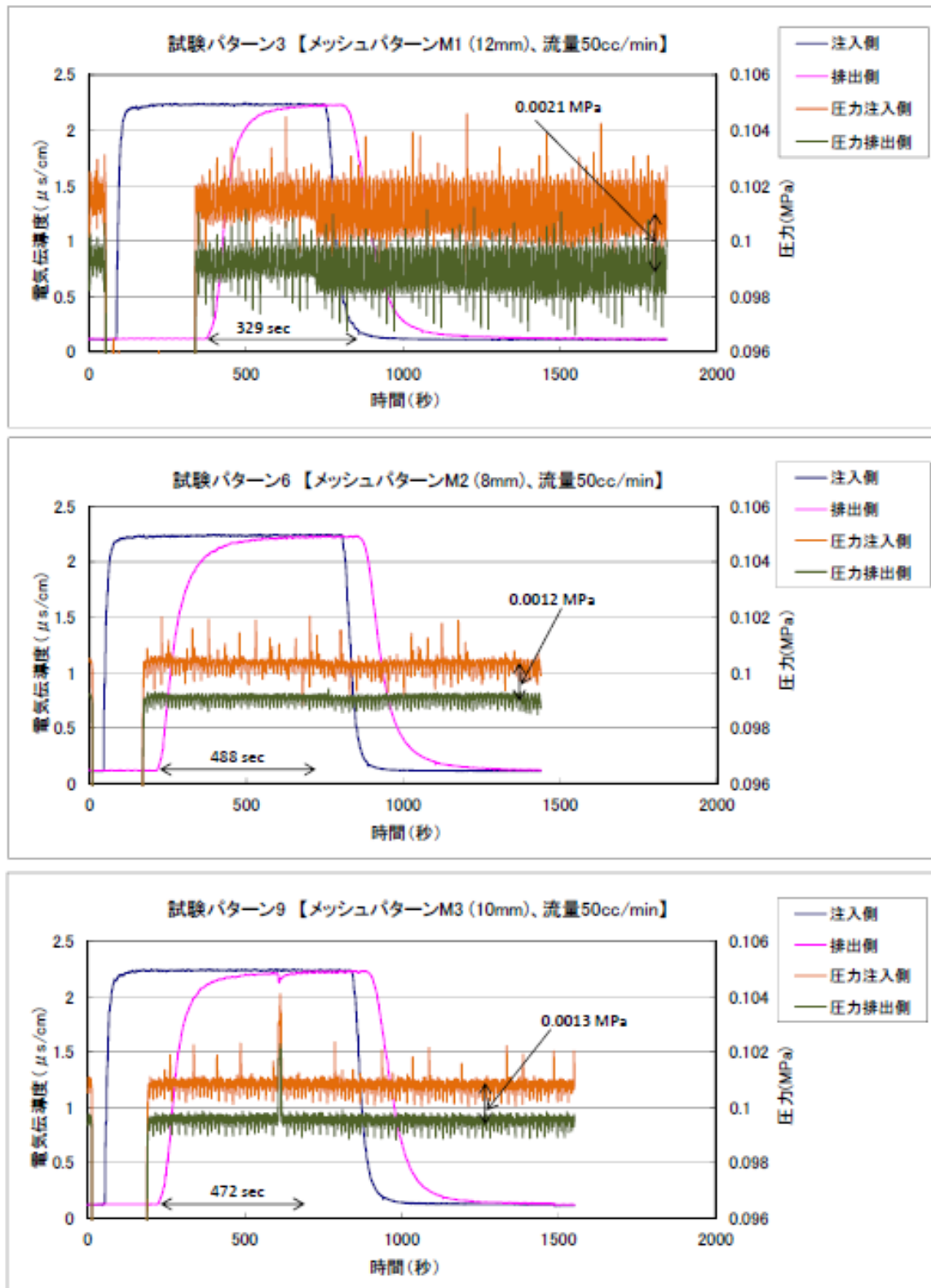


図 2.2-45 流量 50cc/min 時の試験パターン 3、6、9

上記 9 パターンの排水側の電気伝導度結果から求めた置換時間と圧力損失抵抗および区間容積を表 2.2-6 示す。また、図 2.2-46 に排水側の置換時間とメッシュ形状を、図 2.2-47 にメッシュ通過時の圧力損失抵抗を示す。この表と図から解るように、区間容積と置換時間および圧力損失抵抗との関係性は見いだせなかった。置換時間に関してみれば、Peek スペーサのφ12mm を用いたメッシュパターの M1 が、トレーサを早く置換することができた。M1 はメッシュ内を通過する圧力損失抵抗が一番大きいものの、メッシュ部の透水性は E-2 オーダーと高透水性であった。

表 2.2-6 排水側の置換時間と圧力損失抵抗および区間容積

メッシュ パターン	150cc/min	100cc/min	50cc/min
	排水側置換時間		
	sec		
M1	64	154	329
M2	111	247	488
M3	85	198	472

メッシュ パターン	区間容積 (cc)
M1	11.96
M2	13.33
M3	6.64

メッシュ パターン	150cc/min	100cc/min	50cc/min
	圧力損失抵抗		
	mH ₂ O		
M1	1.02	0.5712	0.2142
M2	0.5406	0.2958	0.1224
M3	0.5712	0.306	0.1326

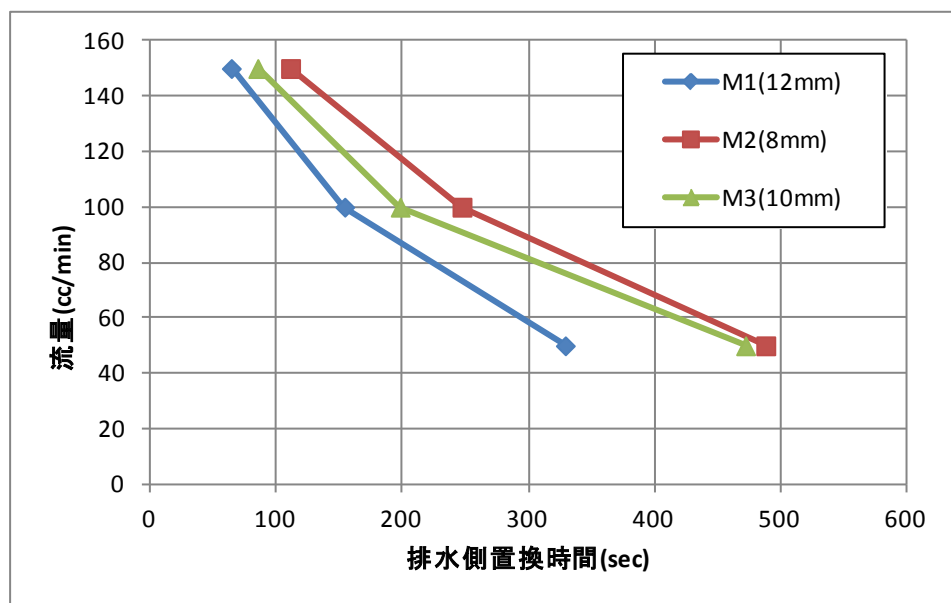


図 2.2-46 排水側の置換時間とメッシュ形状

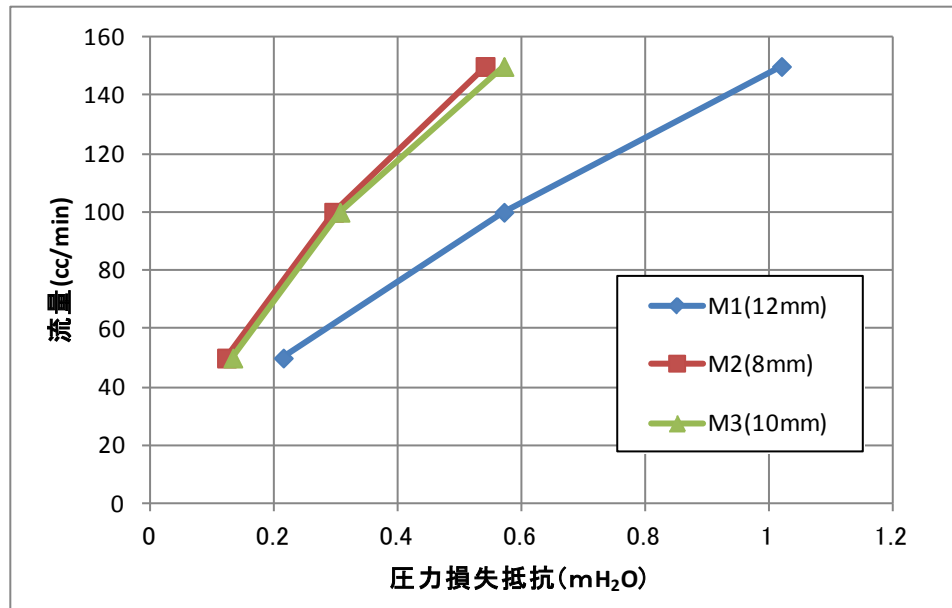


図 2.2-47 メッシュ通過時の圧力損失抵抗

以上の結果より、今回の組み合わせの試験区間形成では、ポリエステルメッシュ #5500 と外径 12mm、厚さ 1.5mm の Peek 材スペーサを 3mm 間隔で配置するメッシュパターンが、最も効率良くトレーサを置換できることが判明した。しかし、実際の試験によっては試験装置に対して流量と圧力損失の関係上、メッシュパターン M1 の圧力損失抵抗大きすぎる場合も考えられるので、その時には、他のパターンを考慮する必要がある。

今回の実験では、実際の装置を模して蛍光染料濃度計測部とほぼ同じ位置に EC メーターを設置して試験したが、図 2.2-48 の入力側の濃度の経時変化で示されるように濃度の立ち上がりが悪いことが判明した。この現象は、ポンプの溶液吸込み口と EC メーターまでの約 2m 長の配管内でのトレーサ溶液の分散が原因と考えらる。このことから、実際に製作される装置においては、蛍光染料濃度計測部とポートとの距離の短縮および、地上装置から試験区間までの配管内でのトレーサ溶液の分散等を防ぐ設計が課題となる。

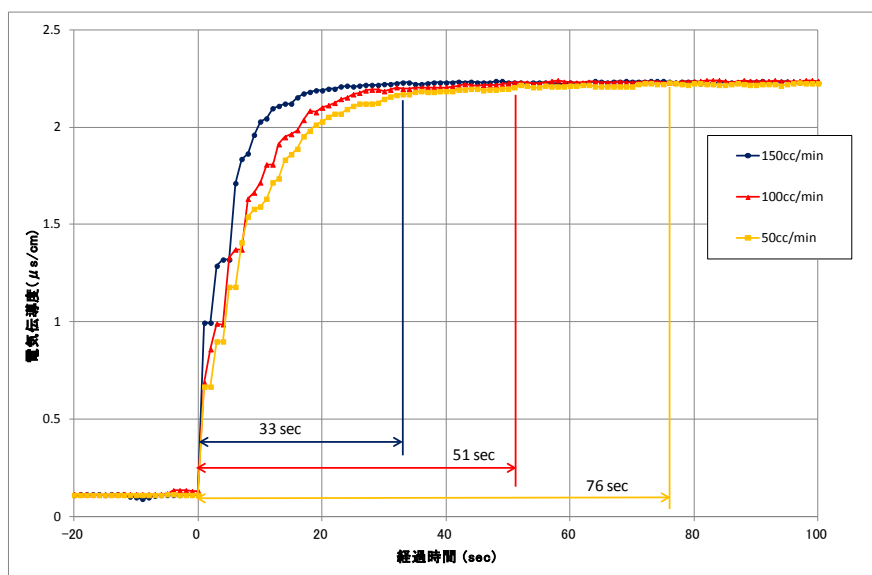


図 2.2-48 入力側の濃度の経時変化

2.2.2.6 試験区間形成部材の吸着試験

原子力環境整備機構による実際の精密調査時のトレーサ試験では、岩盤への収着性を調べるため非放射性の Cs、Sr、Na 等のトレーサを用いることが想定される。したがって、今回、試験区間形成のために新規に使用するポリエステルメッシュと Peek 材スペーサの吸着性を確認した。

試験の試料は、ポリエステルメッシュの #5500 と更に透水性の向上が期待される #5900 および Peek 材とした。使用した試料の材質を表 2.2-7 に、図 2.2-49～51 に試験材料を示す。

表 2.2-7 試験材料とその材質

試験材料名	材質	試験方法
スペーサ	PEEK450G	バッチ試験
ポリエステルメッシュ 5500	ポリエチレンテレフタレート	バッチ試験
ポリエステルメッシュ 5900	有機アミン塩/メラミン樹脂	バッチ試験

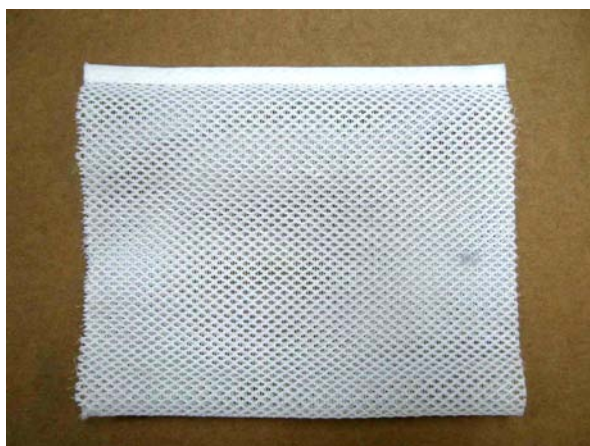


図 2.2-49 ポリエステルメッシュ 5500

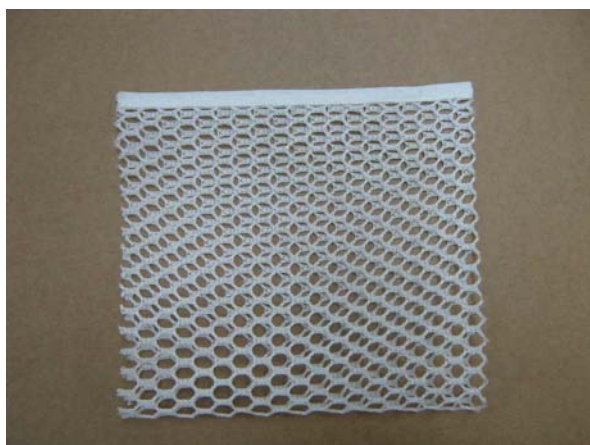


図 2.2-50 ポリエステルメッシュ 5900



図 2.2-51 PEEK450G スペーサ

試験は、収着性の高い非放射性の Cs、Sr、Na の水溶液を作成し、上記材料に対する吸着性を測定した。測定には ICP-MS を使用し定量した。また、試験材料は超純水で洗浄し、容器や器具に関しては超純水で洗浄して使用時共洗いした。表 2.2-8 に使用機器及び器具を示す。

また、試験で使用した容器、器具は新品を用いて、使い捨てとした。

表 2.2-8 使用機器及び器具

使用機器及び器具	型番等	メーカー	備考
天びん	AEX-200B	島津製作所製	0.1mg を秤量できるもの
pH 計	F-11	堀場製作所製	
振とう機	TS-10	TAITEC 製	
ICP 質量分析装置	ICPM-8500	島津製作所製	
マイクロピペット	100 μ L, 1mL, 5mL 容	ニチリョー製	
マイクロピペット用チップ	上記ピペット用	ニチリョー製等	ポリプロピレン製
シリンジ		ADVANTEC	
メンブランフィルター		ADVANTEC	0.45 μ m
樹脂製容器	250mL 容		テフロン製
樹脂製容器	15, 50, 1000ml 容		ポリプロピレン製
試薬	型番等	メーカー等	備考
超純水	NANOPURE-Infinity	Barnstead社製	比抵抗値 18M Ω ・cm 以上
硝酸	超高純度	多摩科学	
塩酸	超高純度	多摩科学	pH 調整用(1mol/L HCl)
水酸化ナトリウム	試薬特級	和光純薬	pH 調整用(1mol/L NaOH)
セシウム標準溶液	Cs1000	関東化学	
ストロンチウム標準溶液	Sr1000	関東化学	
ナトリウム標準溶液	Na1000	関東化学	

バッチ試験の手順を以下に示す。

- ① 試験溶液（ストック溶液（各元素 1ppm）及び超純水（1+9））を樹脂製容器（250mL）に入れ攪拌後、pH8 に調整する
- ② 各試験材料を入れ、振とう機で振とう（60rpm）する（試験溶液と各試験材料の容積比は、試験区間の条件が最も厳しくなる場合を想定し、9:5 とした。）
- ③ 蓋と容器本体との隙間から溶液蒸発を防ぐため、蓋と本体はパラフィルムを巻き密閉する
- ④ シリンジで 10mL 程度試料を採取し、フィルタを装着する（ICP-MS の分析用試料の採取は、試験開始前及び試験開始後 1 時間、1 日、7 日、14 日経過時点で行う）
- ⑤ ろ液を樹脂製容器（15mL）に 2mL 程度分注し、1mol/L 硝酸を添加（溶液量の 1%）する
- ⑥ 残りの試料（ろ液）で 10mL に定容し、定時まで冷蔵庫で保管する
- ⑦ 分析用試料を ICP-MS（質量数 Cs133、Sr88、Na23）に導入し、定量を行う
- ⑧ 他試験材料同様の条件で試験溶液のみ用いてブランク試験を実施する

試験状況を図 2.2-52 に示す。



図 2.2-52 吸着試験状況（左：試験試料 右：振とう風景）

吸着試験の結果を表 2.2-10～12、図 2.2-53～55 に示す。

試料名に記載のあるチェック（ブランク試験）は試験溶液のみを試験容器に入れ、試料を入れない状態での溶液成分の試験容器への吸着を見るものである。このチェックの値の推移と試料を入れた値の推移を比較することにより、試料自体の吸着性を確認できる。

吸着試験の結果、Cs については、チェックと同様の傾向であり、素材への吸着は見られなかった。Sr はポリエステルメッシュ 5500 において吸着が見られた。Na はポリエステルメッシュ 5500、5900 の材料にて吸着とは逆に溶出が見られた。ポリエステルメッシュ 5500 はポリエチレンテレフタレート、ポリエステルメッシュ 5900 は有機アミン塩、メラミン樹脂を主成分としているが、他物質も含んでおり、数％程度 Na 化合物も含んでいる。洗浄、染色加工時にも Na 化合物を使用しており、試験前に超純水での洗浄を実施しても溶出は避けられないと考えられる。ポリエステルメッシュの市販品には Na が含まれており、溶出することが確認されたが、ポリエステルメッシュは材質を選んで製作することが可能であるため、収着性トレーサとして Na を使用する場合は、特注品として製作することが可能である。

以上のことから、表 2-2-9 に吸着試験結果を示すとおりトレーサの種類によって透水性材料の組合せが必要となる。

表 2.2-9 試験結果一覧

		試料		
		ポリエステルメッシュ5500	ポリエステルメッシュ5900	PEEKスベーク
トレーサ	Cs	吸着なし	吸着なし	吸着なし
	Sr	吸着あり	吸着なし	吸着なし
	Na	溶出あり	溶出あり	吸着なし

表 2.2-10 Cs 吸着試験結果

試料名	試験開始前	1 時間後	1 日後	7 日後	14 日後
スぺーサ	0.1000	0.0835	0.0874	0.0800	0.0880
ポリエステルメッシュ 5500	0.1000	0.0814	0.0759	0.0759	0.0809
ポリエステルメッシュ 5900	0.1000	0.0894	0.0761	0.0752	0.0776
チェック	0.1000	0.0929	0.0934	0.0883	0.0944

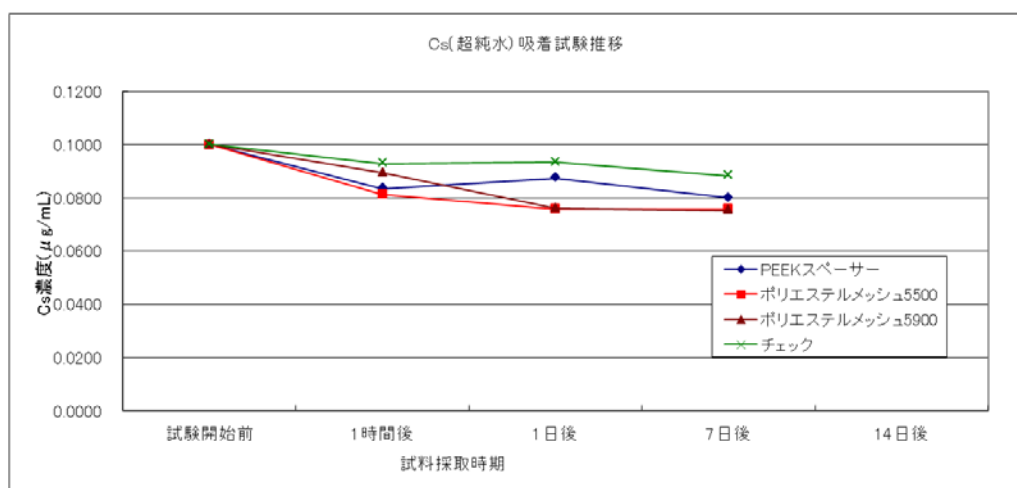


図 2.2-53 Cs 吸着試験結果

表 2.2-11 Sr 吸着試験結果

試料名	試験開始前	1 時間後	1 日後	7 日後	14 日後
スぺーサ	0.1000	0.0937	0.0898	0.0894	0.0960
ポリエステルメッシュ 5500	0.1000	0.0303	0.0310	0.0395	0.0430
ポリエステルメッシュ 5900	0.1000	0.0903	0.0983	0.1020	0.1030
チェック	0.1000	0.0938	0.0944	0.0926	0.0954

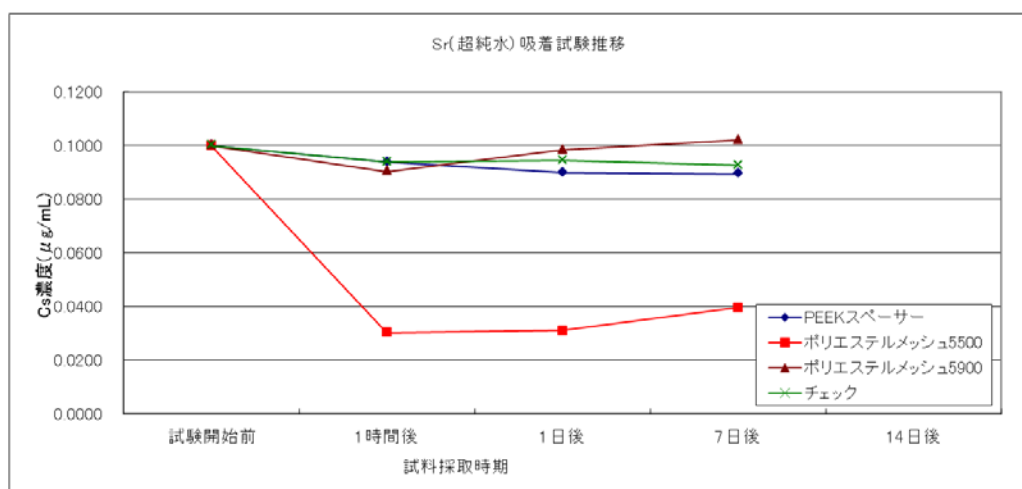


図 2.2-54 Sr 吸着試験結果

表 2.2-12 Na 吸着試験結果

試料名	試験開始前	1 時間後	1 日後	7 日後	14 日後
スペーサ	0.1000	0.1670	0.1730	0.1890	0.1900
ポリエステルメッシュ 5500	0.1000	1.2400	1.6200	1.8700	1.9000
ポリエステルメッシュ 5900	0.1000	0.8820	1.7100	1.8800	1.9000
チェック	0.1000	0.1010	0.0934	0.1010	0.1020

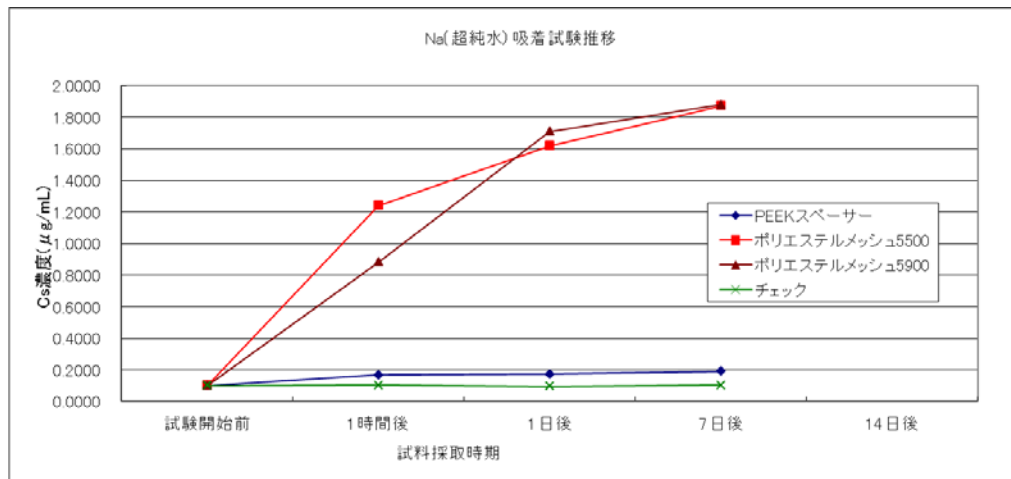


図 2.2-55 Na 吸着試験結果

2.3 高精度圧力計への変更

現在トレーサ試験装置の孔内装置で使用しているアナログ式圧力計（Pressure Systems 社 型番:735S-142-0A298.2）2 台をデジタル式圧力計（Mensor 製 CPT6000）2 台へ交換した。

尚、Mensor 製 CPT6000 は平成 22 年度に実施したデジタル圧力計 7 台追加時に使用した DPT6000 のメーカー型番変更後の現行品である。また、国内での適応試験を視野に置き圧力計の容量は 5MPa とした。

2.3.1 圧力計の仕様

改良前の圧力計の精度は 2Mpa 容量の圧力計で 0.05%R0（約±10.5cmH₂O）であり、その精度に応じて表示計内の A/D 変換は約 10cmH₂O の分解能であった。今回採用した 5Mpa 容量の圧力計（Mensor 社製 CPT6000）の精度は、0.020%F.S.（約±10cmH₂O）であり、デジタル式の圧力計のため分解能は 10ppm（約 1mmH₂O）である。この圧力計を採用することで、試験時観測される圧力は 2.5 倍の容量においても変更前に比べ精度では変わらず、分解能においては 100 倍向上する。変更した圧力計の外観を（図 2.3-1）に、仕様を表 2.3-1 に示す。



図 2.3-1 Mensor 社製 CPT6000

表 2.3-1 Mensor 社製 CPT6000 の主な仕様

レンジ	5MPa
精度	0.020%F. S.
分解能	10ppm
耐圧	150%F. S.
補償温度	15～45℃
更新速度	50 回/秒
接続	RS-232 or RS-485
最大接続距離	4000feet (RS-485)
ケースサイズ	直径 4.45 cm×高さ 15.24cm
フィッティング	1/4 インチ NPT メネジ
電源	6-20VDC、45mA@12VDC

2.3.2 圧力計の変更箇所

トレーサ試験装置内の圧力計は注水側、揚水側共に図 2.3-2 に示す A、B、C 及び孔内装置上側、孔内装置内、下側の 6 箇所ずつ計 12 台が取り付けられており、昨年度までに注水側の A、C と孔内装置上側、下側の 4 台、揚水側の C、孔内装置上側と下側の 3 台の計 7 台が変更済みである。今回デジタル圧力計を交換したのは、孔内装置内（名称：孔内圧力（中））の 2 ヶ所である。

なお追加した圧力計である CPT6000 は平成 22 年度に追加した DPT6000 に比べてボディーアースの取り方によってはノイズが増加することが判明した。そのためケーブルのハウジングとケーブルのグラウンド線を繋ぐ改良を実施することで、DPT6000 相当のノイズレベルにまで減少することができた。

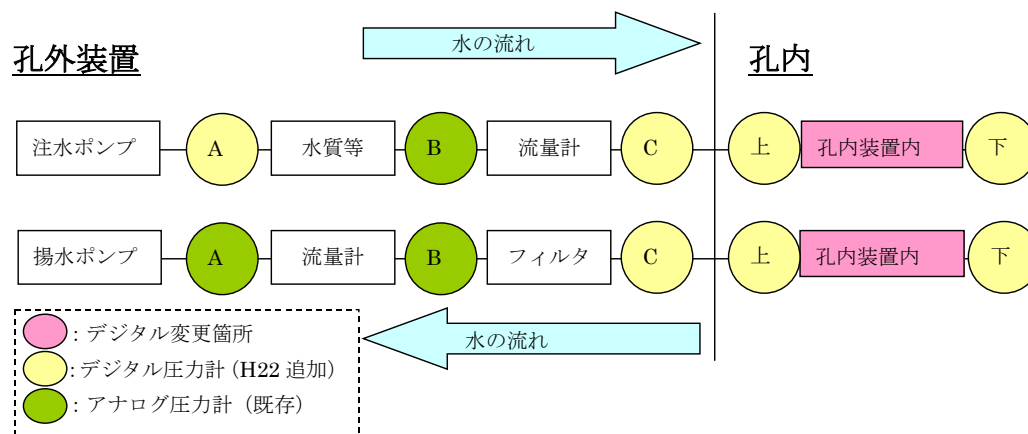


図 2.3-2 圧力計変更箇所

2.3.3 圧力表示計、接続ケーブルの変更、および圧力計用信号変換器の追加

圧力計をデジタル出力の機種に変更したことに伴い、圧力表示計を鶴賀電気社製の 403E-A に変更し、信号変換器 Digi 社製 PortServer TS MEI 4 を追加した。表示計および信号変換器の主な仕様を表 2.3-2 に示す。

表 2.3-2 表示計および信号変換器の主な仕様

分類	機器	メーカー	数量	主な仕様
表示計	403E-A	鶴賀電気	2	RS-485 接続、デジタル表示器
信号変換器	PortServer TS MEI 4	Digi	2	Ether-RS232/485 信号変換器、4 ポート

変更後の配線図を図 2.3-3 に示す。HUB - PortServerTS4（信号変換器）間は LAN ケーブルを使用し、PortserverTS4-DPT-6000（デジタル圧力計）及び PortserverTS4-403E-A（デジタル表示器）間は機器専用の RS-485 ケーブルを使用している。また配線に使用した接続ケーブル一覧を表 2.3-3 に示す。

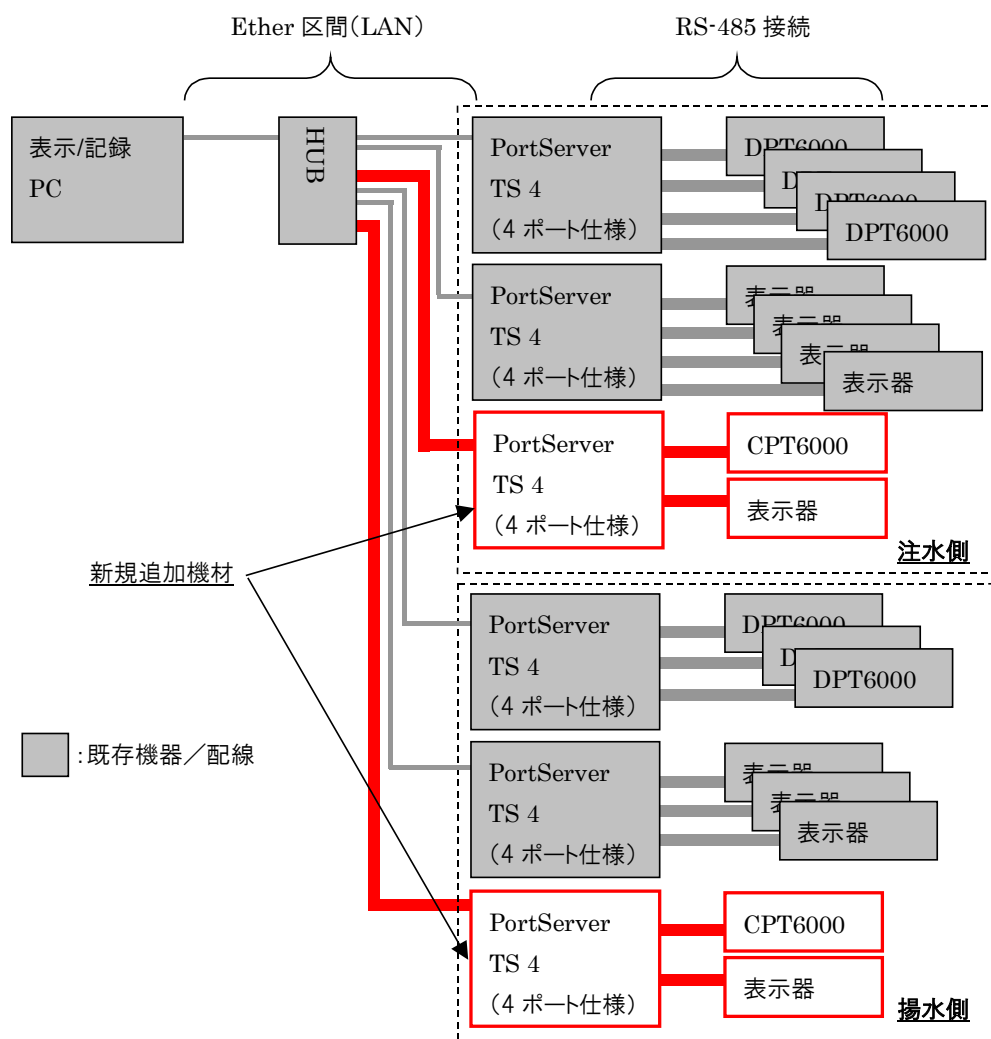


図 2.3-3 圧力計および表示計の配線図

表 2.3-3 接続ケーブル一覧

機材等	数量	ケーブル長	備考
LAN ケーブル (カテゴリ 5e)	2 本	1m	電装 BOX 内 / PortServer TS4
RJ50-RS-485 4 線 半 2 重方式	2 本	75m	電装 BOX ー孔内装置 / CPT6000
RJ50-RS-485 2 線 半 2 重方式	2 本	1m	電装 BOX 内 / 403E-A

今回接続する CPT6000 は、昨年までに変更した圧力計とは異なりボーリング孔内に設置するプローブ内に配置する圧力計である。このため、地上の PortServer TS4 と CPT6000 との間のケーブルは 50 m となる。よって、通信の信頼性向上のため RS-485 を図 2.3-4 に示す 4 線式に変更した。また図 2.3-5 には昨年度の 2 線式配線図を参考として、図 2.3-6 に表示器 403E-A 用接続ケーブルの配線を示す。

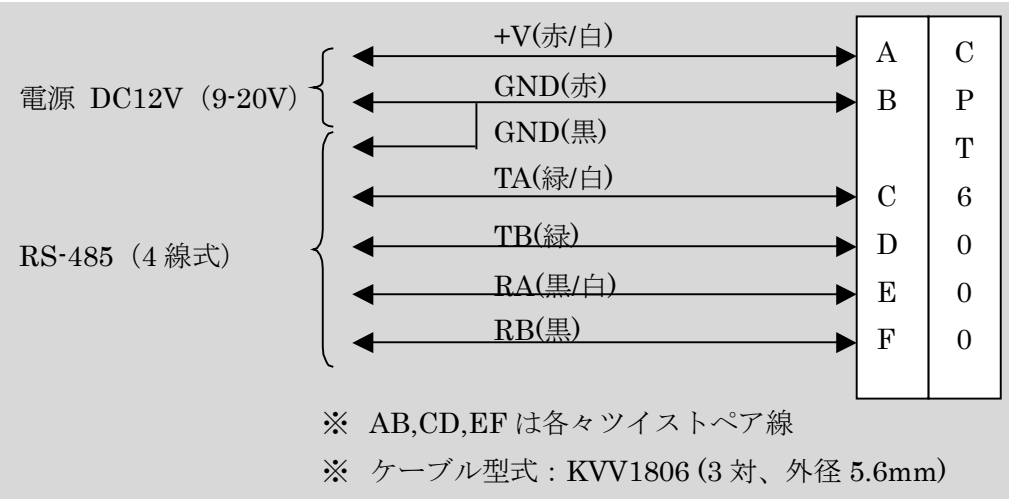


図 2.3-4 CPT6000 用接続ケーブル

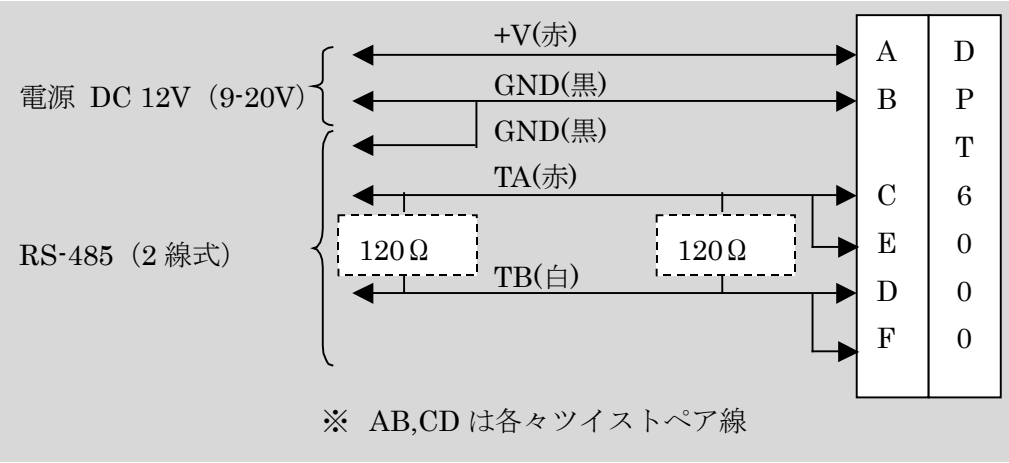


図 2.3-5 参考図（平成 22 年度追加分 DPT6000 用接続ケーブル）

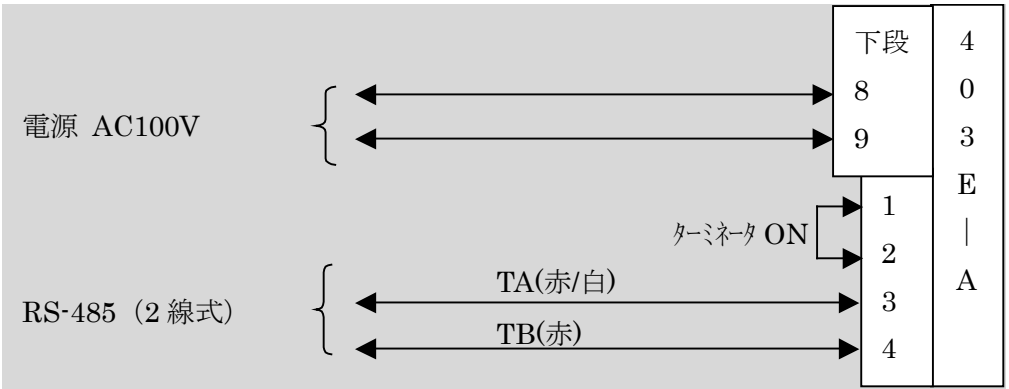


図 2.3-6 表示器 403E-A 用接続ケーブル

2.3.4 計測ソフトウェアの変更

計測ソフトウェア（Geo-Logger）に対してデジタル圧力計およびデジタル表示器の対応数の変更を行った。平成 22 年度では注水側／揚水側それぞれ 4 組（圧力計＋表示器）までの設定が可能だったが、今回の改良において最大 8 組までの設定を可能とした。（但し、シリアル変換器 4 ポート×3 台のためハードウェア的には最大 6 組まで同時使用が可能）

計測ソフトウェア上の「計測設定」より注水側／揚水側毎に「デジタル圧力計」の使用／不使用および各種設定を行うことでデジタル圧力計を使用することが可能となる（図 2.3-7～図 2.3-9 参照）。

表 2.3-4 に設定値一覧を示す。

尚、従来アナログ圧力計のデータ記録に使用していた A/D（注水側/揚水側各 30ch）との併用が可能である。



図 2.3-7 計測設定ダイアログ画面

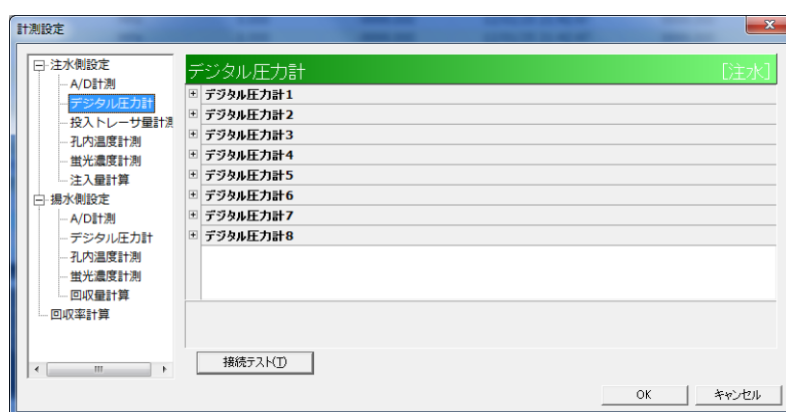


図 2.3-8 デジタル圧力計設定画面

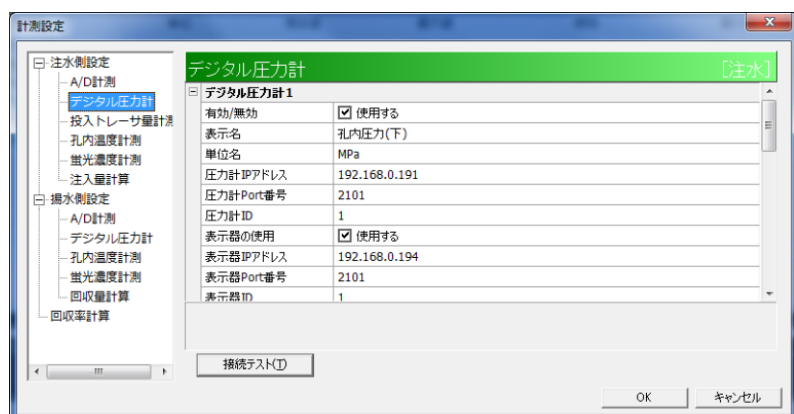


図 2.3-9 デジタル圧力計設定例

表 2.3-4 設定値一覧

箇所	分類	表示名	単位名	IP アドレス	Port 番号	ID	機器
注水側	デジタル圧力計 1	孔内圧力（下）	MPa	192.168.3.151	2101	1	DPT6000
				192.168.3.153	2101	1	403E-A
	デジタル圧力計 2	孔内圧力（上）	MPa	192.168.3.151	2102	2	DPT6000
				192.168.3.153	2102	2	403E-A
	デジタル圧力計 3	孔外圧力（A）	MPa	192.168.3.151	2103	3	DPT6000
				192.168.3.153	2103	3	403E-A
	デジタル圧力計 4	孔外圧力（C）	MPa	192.168.3.151	2104	4	DPT6000
				192.168.3.153	2104	4	403E-A
揚水側	デジタル圧力計 5	孔内圧力（中）	MPa	192.168.3.155	2101	8	CPT6000
				192.168.3.155	2103	5	403E-A
	デジタル圧力計 6	未使用	---	---	---	---	---
				---	---	---	---
	デジタル圧力計 7	未使用	---	---	---	---	---
				---	---	---	---
	デジタル圧力計 8	未使用	---	---	---	---	---
				---	---	---	---
	デジタル圧力計 1	孔内圧力（下）	MPa	192.168.3.152	2101	5	DPT6000
				192.168.3.154	2101	1	403E-A
	デジタル圧力計 2	孔内圧力（上）	MPa	192.168.3.152	2102	6	DPT6000
				192.168.3.154	2102	2	403E-A
	デジタル圧力計 3	孔外圧力（C）	MPa	192.168.3.152	2103	7	DPT6000
				192.168.3.154	2103	3	403E-A
	デジタル圧力計 4	未使用	---	192.168.3.152	2104	---	---
				192.168.3.154	2104	---	---
	デジタル圧力計 5	孔内圧力（中）	MPa	192.168.3.156	2101	9	CPT6000
				192.168.3.156	2103	5	403E-A
	デジタル圧力計 6	未使用					
	デジタル圧力計 7	未使用					
	デジタル圧力計 8	未使用					

※太字は追加したデジタル圧力計に関する設定

2.3.5 新規デジタル圧力計のノイズ対策

追加した圧力計である CPT6000 は H22 年度に追加した DPT6000 に比べて波形の振れ幅が大きくノイズが増加した。CPT6000 は平成 22 年度に実施したデジタル圧力計 7 台追加時に追加した DPT6000 のメーカー型番変更後の現行品である。ノイズはセンサを置く場所やアースグランドの取り方により異なるためアースグランドの方法に問題があると考えられた。下記にノイズ状況と対処方法を示す。

2.3.5.1 改良前ノイズ状況

机上、床面の 2 箇所に新規導入した圧力計 CPT6000、及び旧来使用していた圧力計 DPT6000 を置きノイズ状況を確認した。図 2.3-10、図 2.3-11 に各波形を示す。

DPT6000 がいずれの場所でも安定しているのに対し、CPT6000 は場所によりノイズレベルが大きく左右されることが確認された。

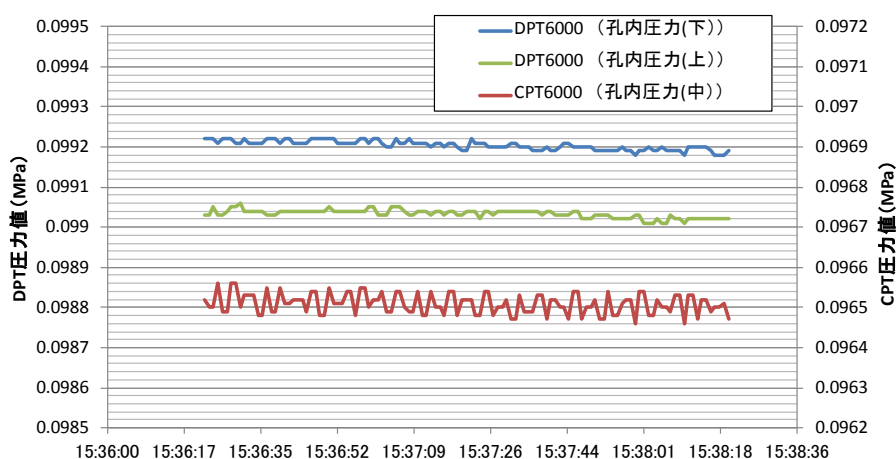


図 2.3-10 机上に置いた際のノイズレベル

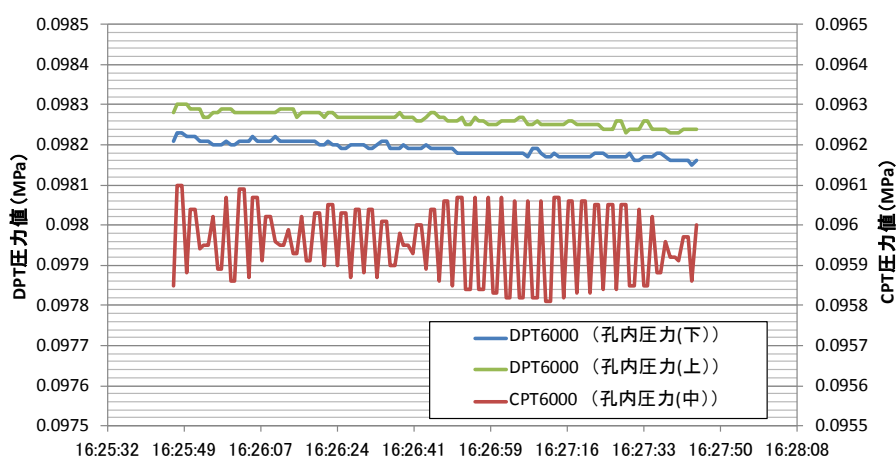


図 2.3-11 床面に置いた際のノイズレベル

最もノイズの大きい床面にセンサを置いて様々な位置にアース線を接続させてノイズレベルを確認した。その際最もノイズが低減した場所は、アース線をセンサケーブルのコネクタハウジング部に接続させた場合であった（図 2.3-12、図 2.3-13 参照）。またその際のノイズレベルは DPT6000 と同程度となることを確認した。



図 2.3-12 コネクタとアース線の接続状況

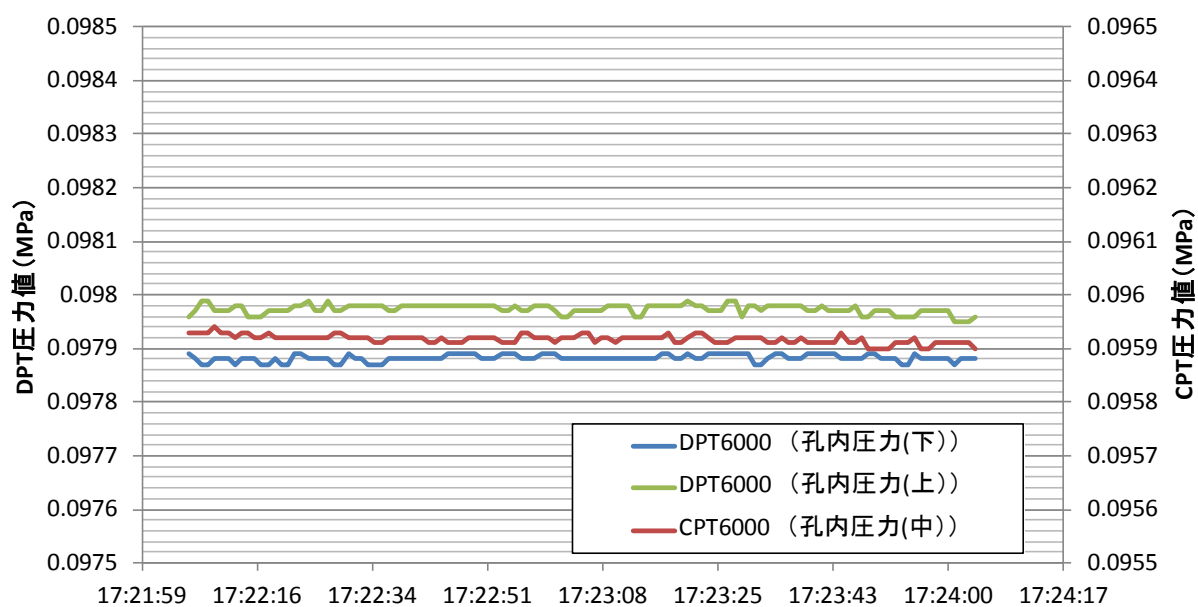


図 2.3-13 コネクタとアース線の接続によるノイズ低減の効果

2.3.5.2 ノイズ対策

アース線をセンサケーブルのコネクタハウジング部に接続させた場合、模式図上では図 2.3-14 のようにケーブルをつなげたことに相当する。なお、コネクタハウジングと CPT6000 ケースの間では導通を確認した。この方法を基に対策を施すことで、CPT6000 は DPT6000 と同等のノイズレベルになると考えられる。

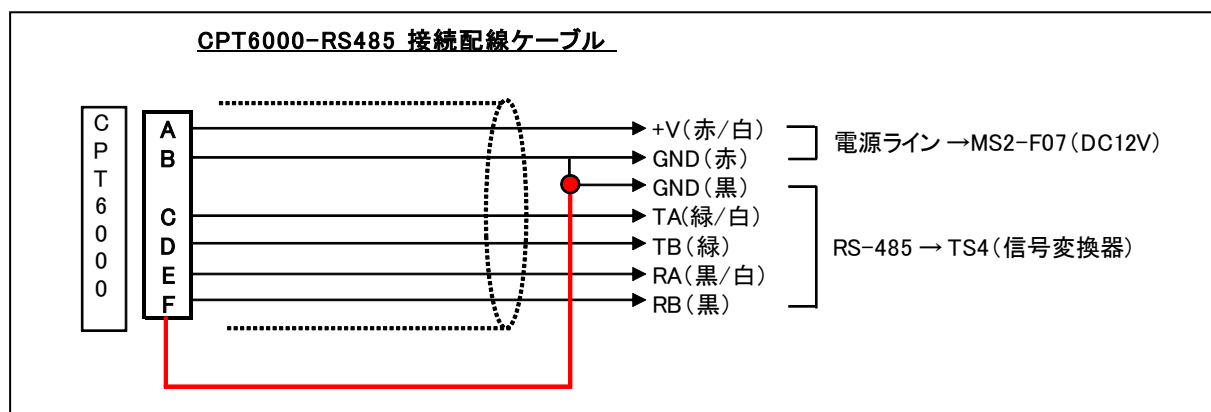


図 2.3-14 アース線による信号線とセンサの接続

以上から、図 2.3-15 の模式図のように新たな対策を施した。これはケーブルのコネクタ部分の加工のみで済み、図 2.3-14 の状態と同等の効果が得られる。図 2.3-16 に対策を施したケーブルの写真を示す。また表 2.3-5 にノイズ対策を施したケーブル一覧を示す。

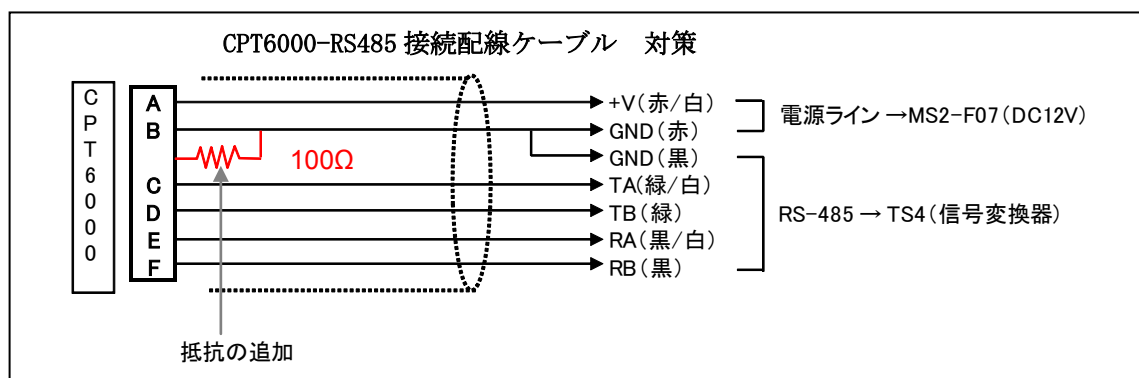


図 2.3-15 対策案 グランド線への抵抗追加



図 2.3-16 グランド線への抵抗追加

表 2.3-5 CPT6000 用ノイズ対策済み接続ケーブル一覧

機材等	数量	ケーブル長	備考
RJ50-RS-485 4 線 半 2 重方式	2 本	75m	電装 BOX-孔内装置 /CPT6000

また、これは CPT6000 の取扱説明書中、図 2.3-17 の赤○部分のアース線を追加したことに相当する。

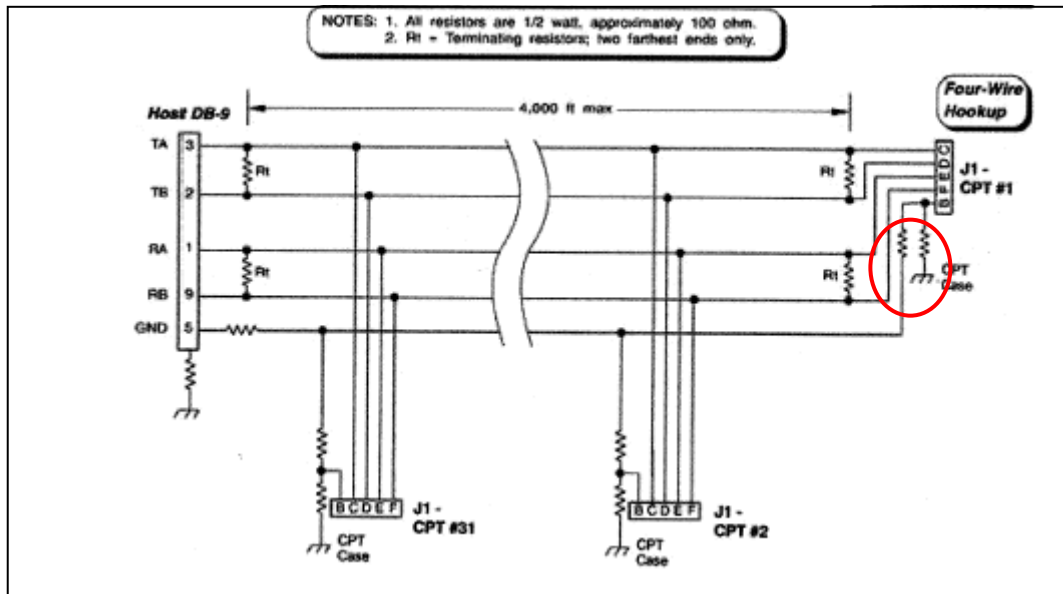


図 2.3-17 CPT6000 取扱説明書内 RS-485Cabling

メーカー代理店によるケーブル改良前後の波形データを図 2.3-18 に示す。

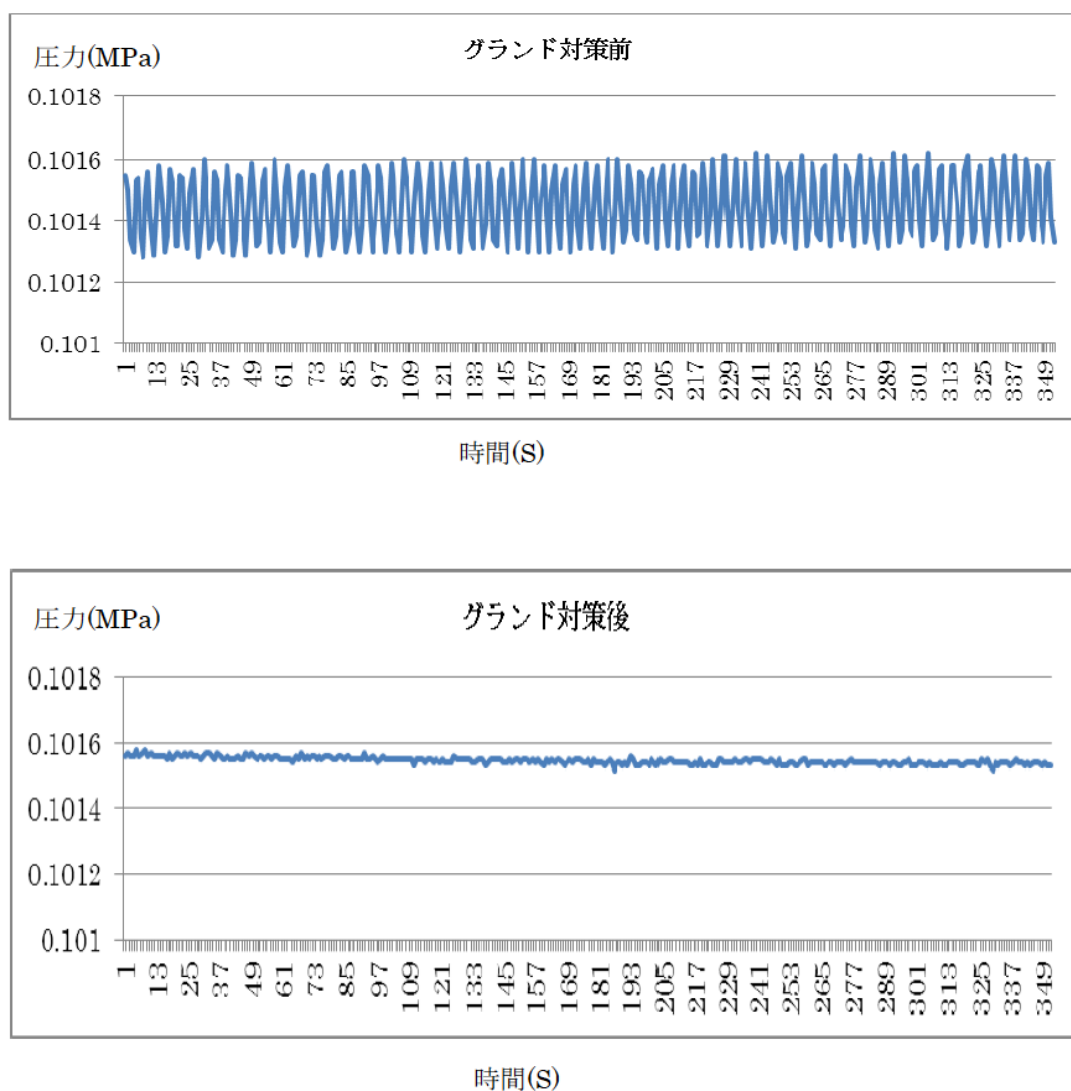


図 2.3-18 ケーブル改良前後の CPT6000 データ

2.3.5.3 改良後ノイズ状況

対策を施したケーブルを用いてトレーサ試験装置に CPT6000 を繋ぎノイズレベルの確認を実施した。

ID No. 8 圧力計の波形を図 2.3-19 に ID No. 9 圧力計の波形を図 2.3-20 に示す。図中緑線は旧ケーブル（対策がなされていないケーブル）を使用した場合、赤線は改良新ケーブルを使用した場合の CPT6000 の大気圧状態下の波形を示す。センサはノイズの大きい床面に設置してデータを取得した。また比較のため同条件下で DPT6000 も波形を取得した（図中青線）。尚、計測は旧ケーブルから改良新ケーブルへ付け替えて行なったため同一の時間で行なわれておらず、また置かれている状況も全く同一ではないため値の絶対値は異なる。

図 2.3-19 と図 2.3-20 より CPT6000 の No. 8、No. 9 双方に旧ケーブルを接続した際にみられていた振れ幅の大きいノイズは、改良したケーブルを接続することによって DPT6000 と同等レベルのノイズレベルまで抑えることができることを確認した。

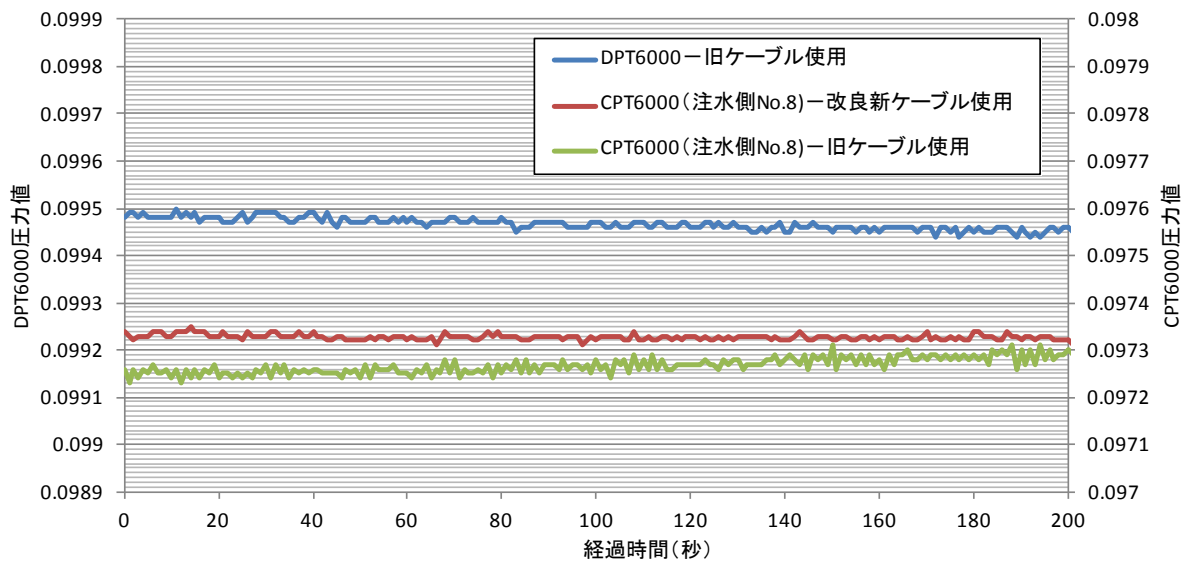


図 2.3-19 CPT6000（揚水側 No. 8）のノイズレベル

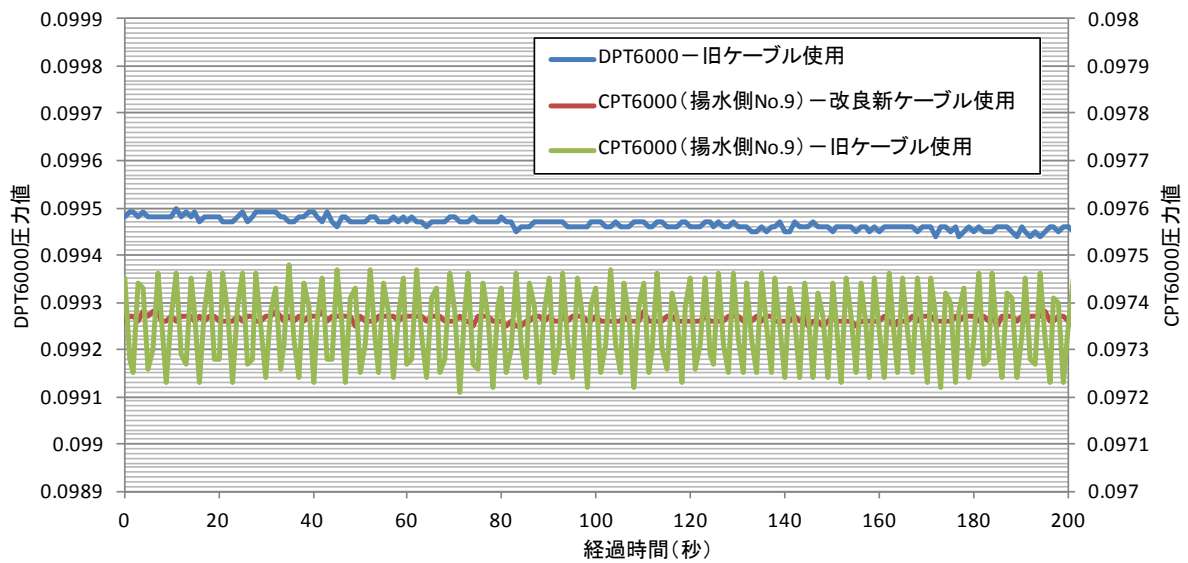


図 2.3-20 CPT6000（揚水側 No. 9）のノイズレベル

また、従来のデジタル圧力計 DPT6000 に今回改良したケーブルを接続した場合も確認した。

図 2.3-21 に DPT6000 の大気圧状態下の波形を示す。青線が従来使用していた旧ケーブル、赤線が改良新ケーブルを接続した場合を示す。図 2.3-21 から DPT6000 に改良新ケーブルを繋いだ場合もノイズレベルが大きくなることなく使用することができることを確認した。

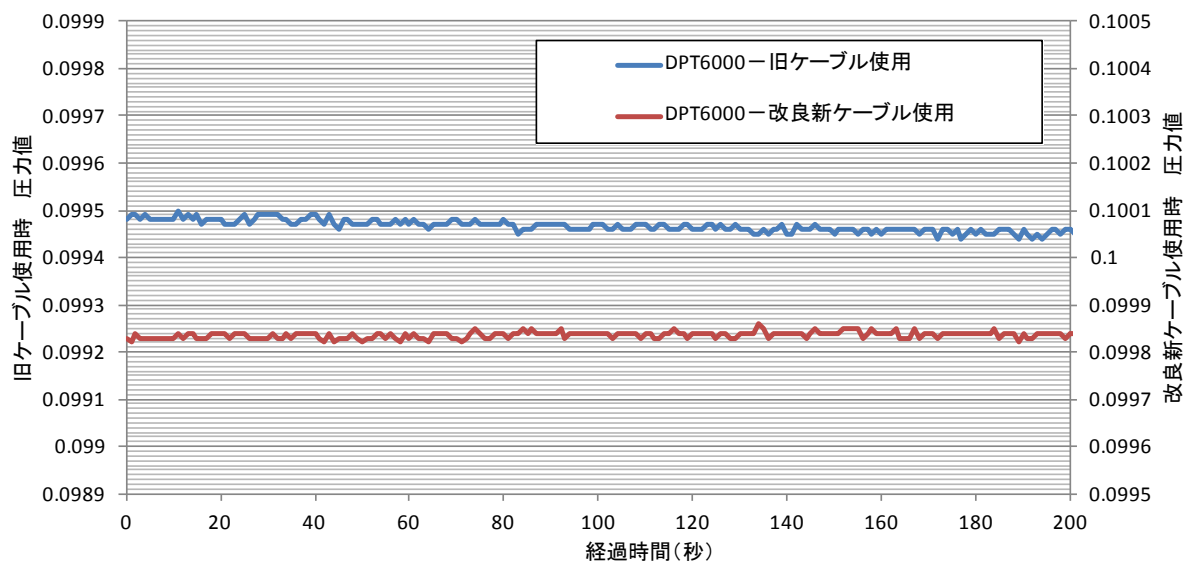


図 2.3-21 DPT6000 に改良新ケーブルを接続した際のノイズレベル

2.3.6 高精度圧力計システムの性能確認試験

変更した圧力計、配管、圧力計表示計および計測プログラムの性能確認試験を行った。

2.3.6.1 圧力表示計の確認

図 2.3-22、図 2.3-23 に変更後の圧力表示計の確認状況を示す。変更していない圧力計では 10^{-3} (MPa) の分解能で表示されているが、変更後の圧力表示計は 10^{-5} (MPa) の分解能で表示されている。



図 2.3-22 変更後の注入側圧力表示計

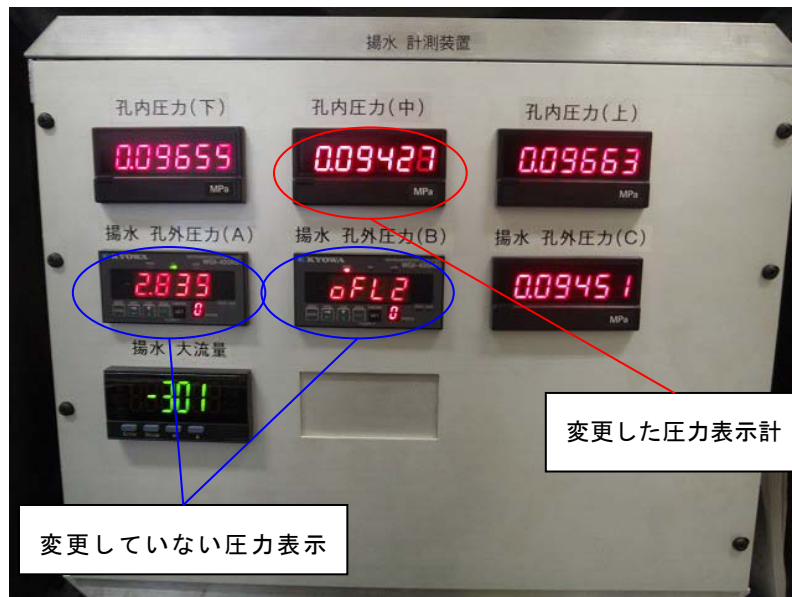


図 2.3-23 変更後の揚水側圧力表示計

2.3.6.2 試験方法

高精度圧力計、圧力表示計、圧力計用信号変換器、接続ケーブルおよび計測プログラムの性能確認試験は以下の手順で実施した。また、昨年度変更した圧力計 7 台も検定を兼ねて同時に確認した。

- ① 変更した 2 台の圧力計および昨年度変更した 7 台の圧力計をチューブで接続して、圧力発生機で加圧する。なお圧力計は姿勢や測定位置による水頭の違いを読み取れるため、圧力計の姿勢と受圧面の高さを一定にした。
- ② 圧力計、圧力表示計、計測プログラムのケーブルを接続し、圧力計の圧力を表示計および計測用 PC で確認する。
- ③ 圧力発生機で 5MPa まで 1MPa ずつ加圧し、漏洩がないことを確認する。ただし圧力発生装置の機構制約上およそ 1MPa 毎の加圧とした。また、この際の圧力表示計の値を記録し、変更した 2 台及び既存の 7 台の圧力計の指示値を比較する。

性能確認試験における機器ごとの合格判定基準は以下とした。

- ・高精度圧力計、圧力表示計、圧力計用信号変換器および接続ケーブル
→全ての圧力表示計の値を比較し、精度の範囲内に収まっていること
- ・計測プログラム
→手順の③で加圧する過程を正常にグラフ描画できること

試験状況を図 2.3-24 と図 2.3-25 に示す。

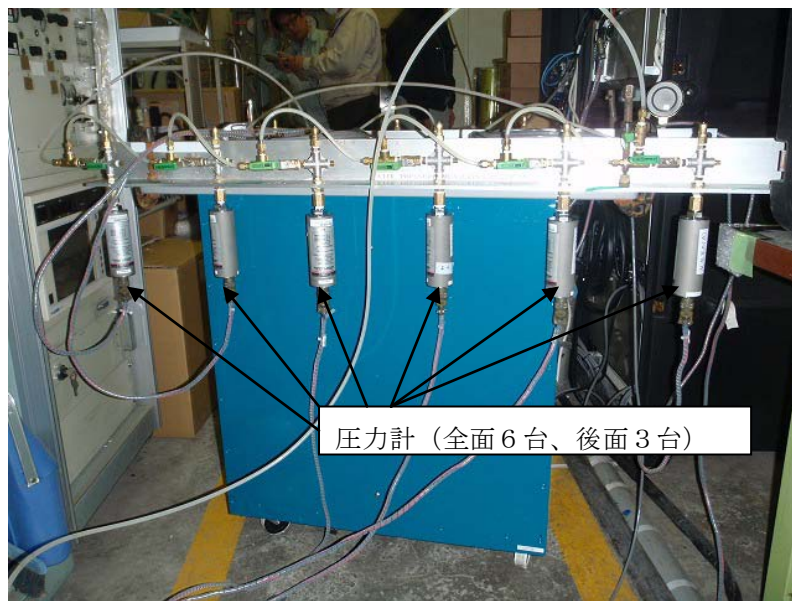


図 2.3-24 圧力計取り付け状況

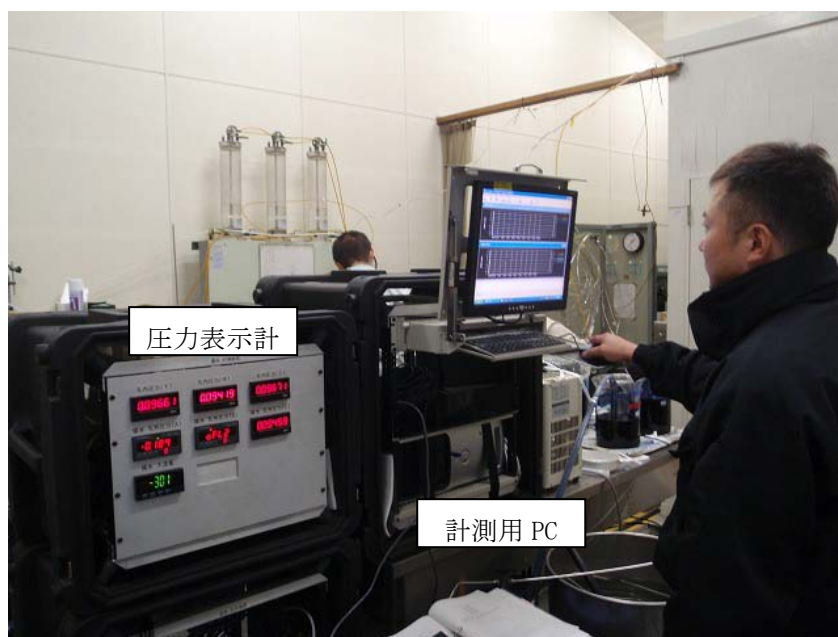


図 2.3-25 性能確認試験状況

2.3.6.3 試験結果

性能確認試験中に計測用 PC で記録された圧力の経時変化を図 2.3-26 に示す。ただし、圧力計は絶対圧で計測されるため、図では各圧力計の性能確認試験開始時の圧力値を 0 としている。

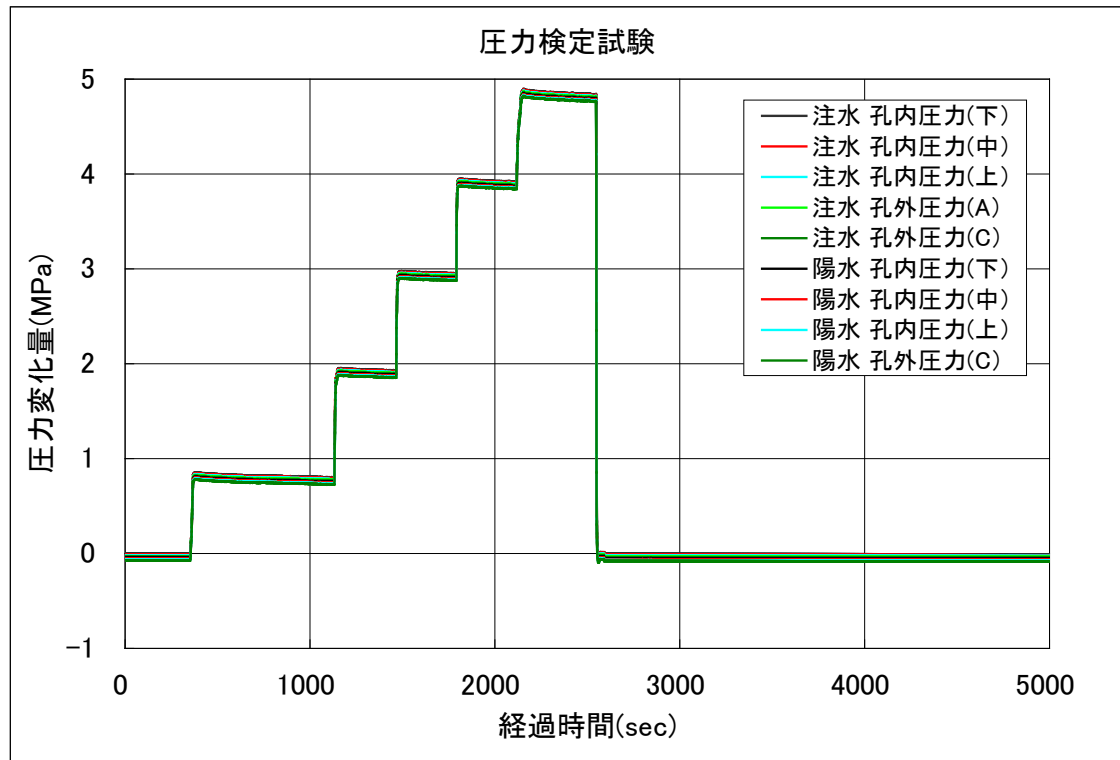


図 2.3-26 性能確認試験中に計測用 PC で計測された圧力変化

性能確認試験中の各圧力段階における各圧力計の計測圧力を表 2.3-6 に示す。本圧力計は絶対圧を出力するため、入力圧力と対比しやすいよう大気圧開放状態の圧力を減じた大気圧補正值を使用している。

表 2.3-6 各圧力段階における計測圧力

設定圧力 変化量 ※1	注水側圧力計 圧力変化量(MPa) ※2					陽水側圧力計 圧力変化量(MPa) ※2			
	孔内 (下)	孔内 (中)	孔内 (上)	孔外 (A)	孔外 (C)	孔内 (下)	孔内 (中)	孔内 (上)	孔外 (C)
1MPa	0.80459	0.80489	0.80461	0.80467	0.80465	0.80460	0.80473	0.80454	0.80451
2MPa	1.93262	1.93280	1.93252	1.93272	1.93268	1.93259	1.93264	1.93254	1.93249
3MPa	2.95765	2.95780	2.95726	2.95766	2.95759	2.95750	2.95748	2.95752	2.95750
4MPa	3.91955	3.91975	3.91902	3.91961	3.91949	3.91936	3.91934	3.91940	3.91943
5MPa	4.84787	4.84821	4.84703	4.84766	4.84741	4.84742	4.84747	4.84728	4.84730

※1 設定圧力変化量は1MPa毎としたが加圧装置の制御の制約のため約1MPaとした。

※2 圧力変化量(MPa)は大気圧開放状態の圧力値を減じた値

計測された圧力は表示計の分解能同様に、表 2.3-6 の数字桁数のように 10^{-5} (MPa) の分解能で計測されていることが確認できた。

各設定圧において、設定圧力と表 2.3-6 の圧力値の平均値との差を表 2.3-7 に示す。本来は圧力校正器をもって基準となる設定圧力とすべきであるが、圧力計が高精度なために正確な圧力値の設定が難しいことから、計測を行なった 9 台の平均値を基準とし、平均値との各圧力計の計測値の差を示し

た。

表 2.3-7 設定圧力と各圧力計出力値の差

設定圧力 変化量 ※1	圧力変化量 平均	圧力差(MPa)※1								
		注水側					陽水側			
		孔内 (下)	孔内 (中)	孔内 (上)	孔外 (A)	孔外 (C)	孔内 (下)	孔内 (中)	孔内 (上)	孔外 (C)
1MPa	0.80464	0.00006	-0.00025	0.00003	-0.00003	-0.00001	0.00005	-0.00009	0.00011	0.00013
2MPa	1.93262	0.00001	-0.00018	0.00011	-0.00010	-0.00006	0.00003	-0.00002	0.00008	0.00013
3MPa	2.95755	-0.00010	-0.00025	0.00029	-0.00011	-0.00004	0.00005	0.00007	0.00004	0.00005
4MPa	3.91944	-0.00011	-0.00031	0.00041	-0.00017	-0.00005	0.00008	0.00010	0.00004	0.00001
5MPa	4.84752	-0.00036	-0.00069	0.00049	-0.00014	0.00011	0.00010	0.00005	0.00023	0.00022

※1 圧力変化量平均からの各圧力計計測値との圧力差

赤字: +側最大誤差 青字: -側最大誤差

圧力計精度: 0.020%F.S(0.001MPa)

本圧力計の精度はフルスケールの 0.02% (0.001MPa) である。表 2.2-7 より、性能確認試験時に全圧力計は精度の範囲 (0.001MPa) で出力したことを確認した。

図 2.3-27、図 2.3-28 に性能確認試験中の計測プログラムのグラフ表示を示す。各グラフ共に上側グラフが孔外、下側グラフが孔内の圧力を示しており、圧力は絶対圧力で表示されている。目視によるデータ読み取りにより、性能確認試験中の圧力計の圧力上昇の様子が正常に描写できていることを確認した。

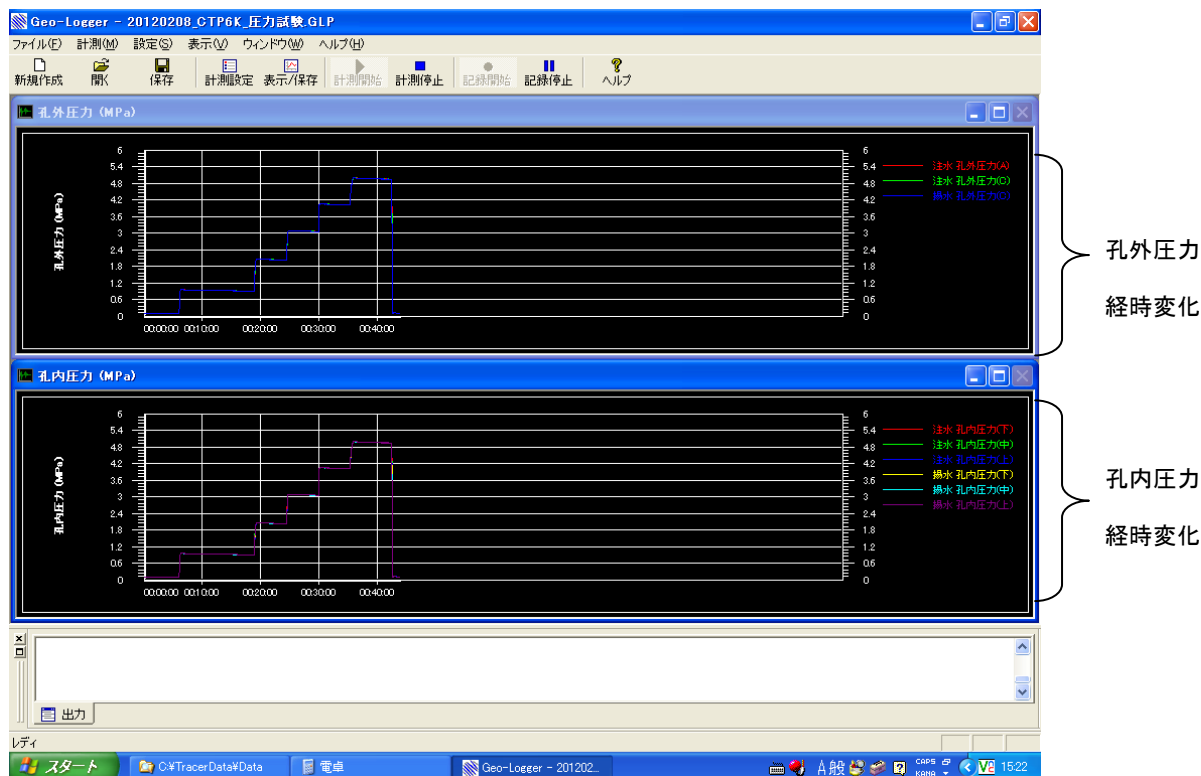


図 2.3-27 性能確認試験中の計測プログラム確認状況

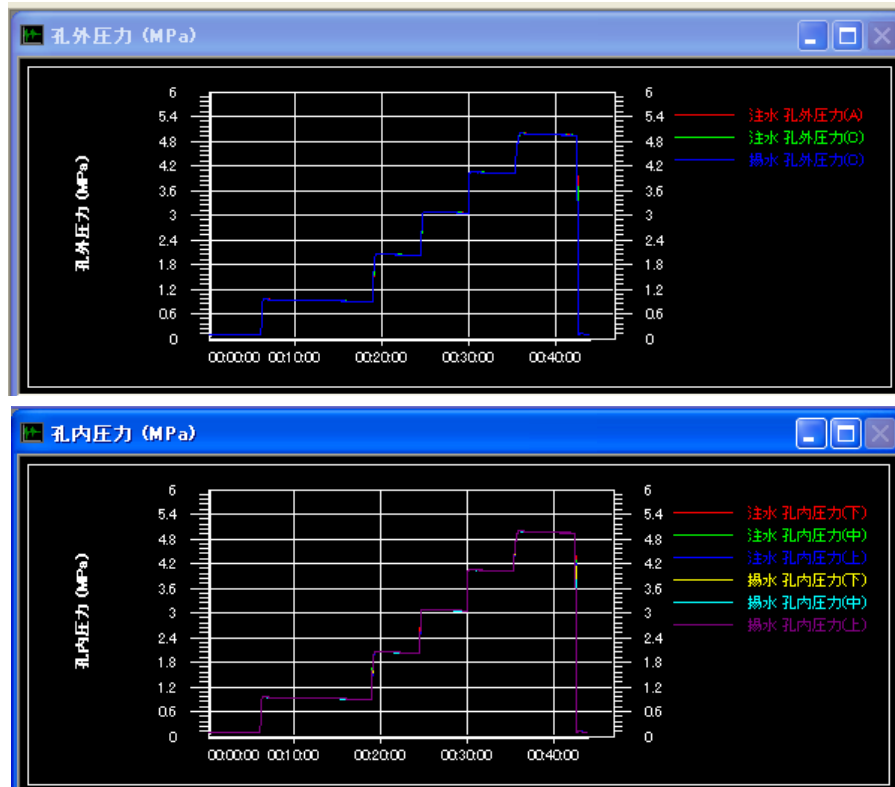


図 2.3-28 性能確認試験中の計測プログラム確認状況拡大図
(上：孔外圧力、下：孔内圧力)

2.4 無脈動ポンプ部の改良

無脈動ポンプの耐圧向上は、平成 21 年度に試作した無脈動ポンプ (2L/min) を改良し、5MPa 環境におけるトレーサ循環試験が可能となる構造とする。そのため軸封部分（シール部）及びケーシング部を 5MPa 環境下で使用出来るように改良した。また、現状の装置ではポンプケーシングの容積が大きくトレーサがポンプケーシング内で濃度分散することからポンプケーシング部の内容積を小さくするための改良を行なった。

2.4.1 無脈動ポンプの耐圧性能の改良

無脈動ポンプの耐圧性は、ポンプケーシング内のユニバーサルジョイントと接続するポンプのモーター軸部（図 2.4-1 参照）である。平成 21 年度に試作した無脈動ポンプはシングルメカニカルシールで耐圧性能は 1MPa であるため、このシール部をバリシールに変更した。バリシールは、片圧シールで U 字型のシールジャケットと V 字型の耐腐食性スプリングで構成され（図 2.4-2 参照）、低圧または無圧状態で金属スプリングによりシール性能を維持し、システム圧力が上昇するとシールジャケットへも同様に加圧され、無圧から高圧条件下で確実なシール性能が維持される。耐圧性能は、運動時最大で 15MPa、静止時最大で 25MPa、環境温度は-100℃～260℃である。

改良前のメカニカルシールと改良に使用したバリシールの写真を図 2. 4-3 に示す。

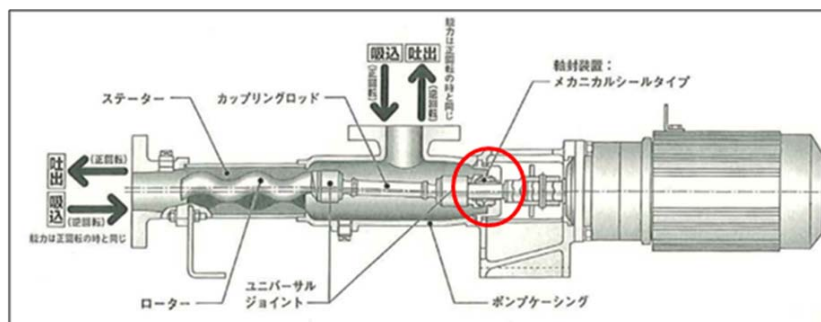


図 2. 4-1 無脈動ポンプの構造とメカニカルシール部の位置

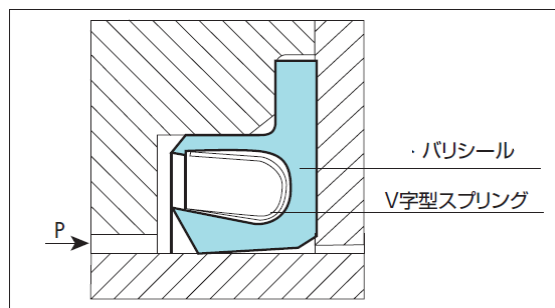


図 2. 4-2 バリシールの構造



図 2. 4-3 改良前と改良後のシール（写真）

2.4.2 ポンプケーシング部の内容積減少のための改良

現状の装置ではポンプケーシングの容積が大きくトレーサを循環させる際、ポンプケーシング内でトレーサ濃度が分散することが懸念されていた。そのためケーシング内容積を減らすために下記に示す改良を行なった。また図 2.4-4 に改良前ケーシングを、図 2.4-5 に改良後ケーシングの図面を示す。また図 2.4-6 と図 2.4-7 に改良前後写真を示した。

①ケーシング内径の変更

- ・改良前ケーシング内径 $\phi 70$ →改良後ケーシング内径 $\phi 57$
- ・上記により可動部とケーシングの最小クリアランス:改良前 8.5mm→改良後 2mm

②ロッド計の変更

- ・ロッド径を太くし内容積を減らすために割りカラーをロッドに設けた。
- ・カラーを取り付けるためロッドの段差をなくした。
- ・上記によりロッド最大径:改良前 $\phi 22$ mm→改良後 $\phi 43$ mm

③軸封側セーフティースリーブの径変更

- ・軸封側ジョイント部は偏心しないためセーフティースリーブはケーシング内径より若干小さい程度に太く出来る。そのため軸封側のセーフティースリーブの最大径を太くした。
- ・上記により軸封側セーフティースリーブ最大径:改良前 $\phi 43$ mm→改良後 $\phi 53$ mm

④軸封シール位置の変更

- ・軸封シールをケーシング側に 14mm 移動することで内容積を減らし、また軸封側のトレーサが滞りやすいと考えられる空間を減らした。

⑤ケーシング吸い込み口の箇所と個数の変更

- ・メインの吸い込み口は軸封側に出来るだけ寄せて上下 2 箇所設けて、トレーサが滞りやすい箇所を少なくして後ろから前にスムーズにトレーサが流れるようにした。
- ・改造によりケーシング内は流路が狭くなり改良前と比べて配管抵抗が大きくなっている。そのため粘度が大きい溶液を流すことも考慮して、流路が比較的広いステーター側（前方）にも吸込み口を設けた。
- ・使用しない吸い込み口は溶液の留まりやすい箇所となるためプラグを設けた。

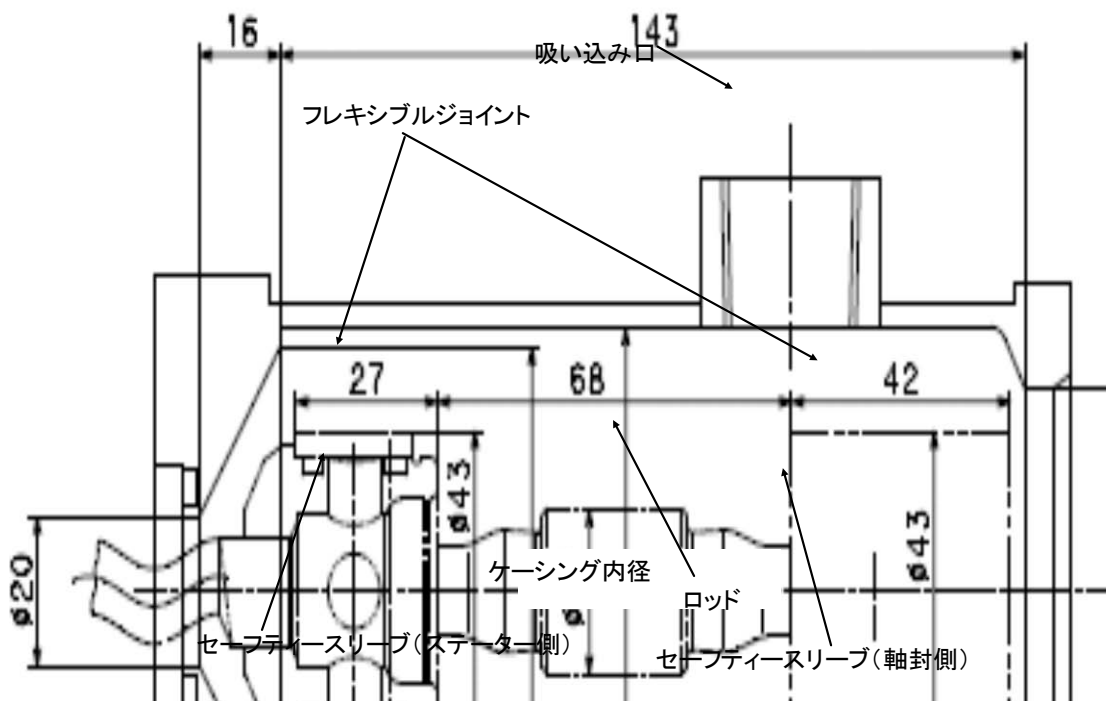


図 2.4-4 改良前ケーシング部

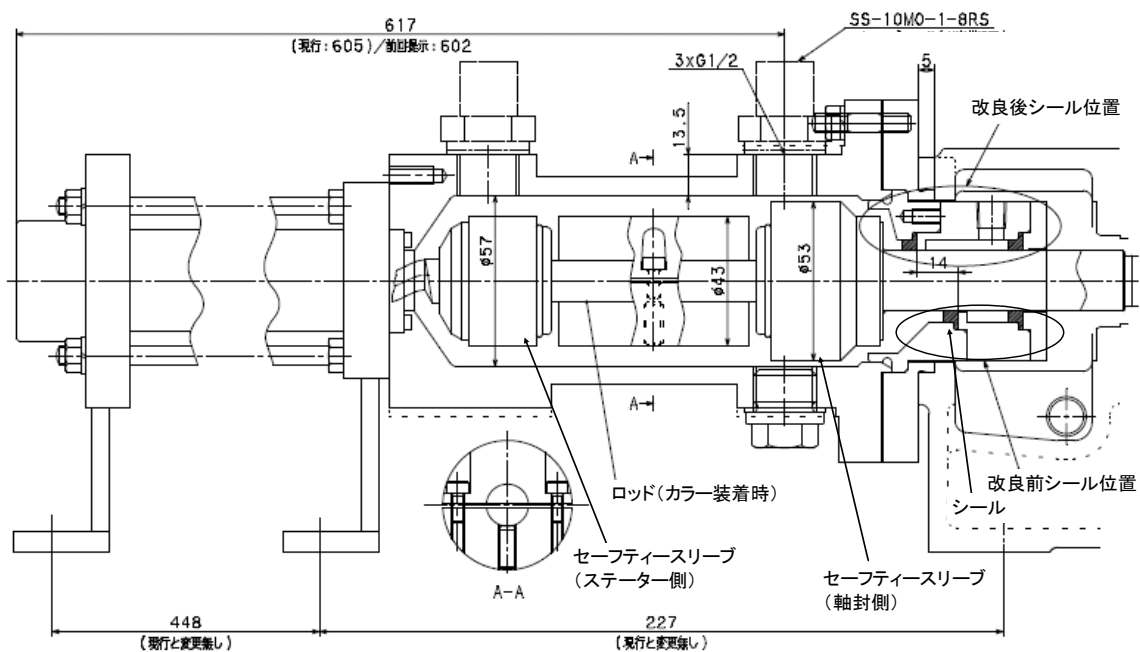


図 2.4-5 改良後ケーシング部



図 2.4-6 ケーシング部の改良前後写真



図 2.4-7 ケーシング内部装置の改良前後写真

上記改良による内容積減少量を確認するためケーシング内容積の測定を改良前と改良後に行なった。測定方法は図 2.4-8、表 2.4-1 に示すように口元まで満水後に下部から水を抜き重量で測定した。測定の結果改良前のケーシング内容積は491mLであり改良後は182mLとなり改良前の37%の内容積となった。

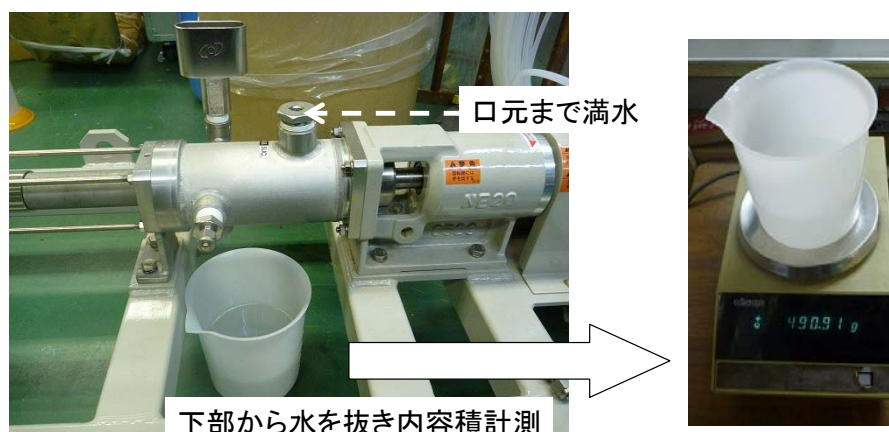


図 2.4-8 ケーシング内容積測定状況

表 2. 4-1 ケーシング内容積測定結果

改良前	改良後
491mL	・ 182mL (改良前の 37%の内容積)

2. 4. 3 無脈動ポンプの性能確認試験

改良した無脈動ポンプに関する性能確認試験を実施した。試験は以下の 2 つの試験を実施し各部の耐圧と濃度分散性能に関する性能を確認した。

- 耐圧性能確認試験
- トレーサ濃度分散低減効果確認試験

下記に各試験の詳細を示す。

2. 4. 3. 1 耐圧性能確認試験

耐圧試験は改良したケーシングが 5MPa に対する耐圧性能を有することを確認するものである。耐圧試験の方法を図 2. 4-9 に示す。

<試験方法>

- ① チャンバータンクに水を入れ、窒素ガスボンベとレギュレーターを用いて 5MPa に加圧する
- ② 加圧後窒素ガスの供給を止め、圧力の著しい低下が生じていないことを確認する
- ③ 無脈動ポンプを動かし水を循環させる。その際チャンバータンクへのガスの供給はしない状態で実施する。また循環流量は無脈動ポンプの最大流量の 2000mL/min で循環させる
- ④ 目視にて配管継手部やシール部に起因する漏洩がないことを確認する
- ⑤ 一時間程度循環を続けた後圧力の減少の有無を確認後減圧し、変形や漏洩がないことを目視で確認する

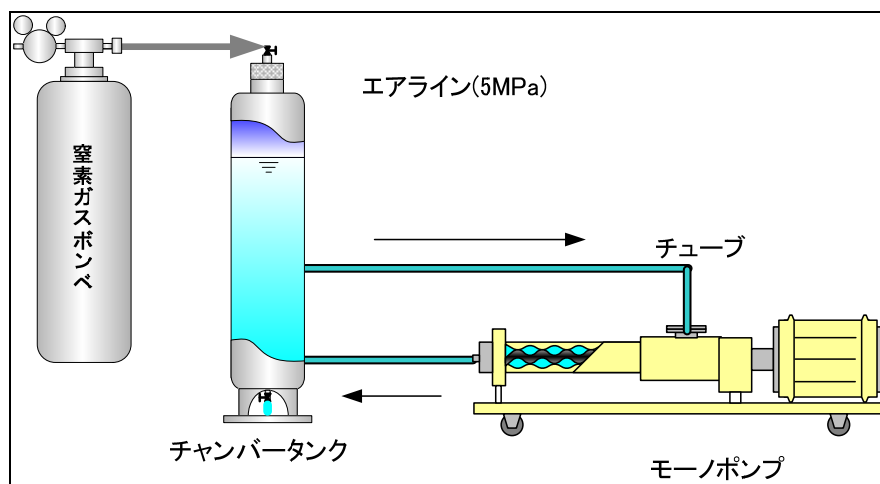


図 2. 4-9 無脈動ポンプの耐圧試験概念図

<試験結果>

耐圧性能確認試験の結果、配管継手部やシール部からの漏洩および変形は認められず、また循環試験中は窒素ガスのチャンバータンクへの供給を止めたが圧力の低下は認められなかった。図 2.4-10 に耐圧性能確認試験（循環時）の圧力と流量結果を、表 2.4-2 に耐圧性能確認試験結果を、図 2.4-11～図 2.4-13 に各部の試験後の写真を示す。

以上の結果から、無脈動ポンプは 5MPa 循環環境下で漏洩なく使用できることを確認した。

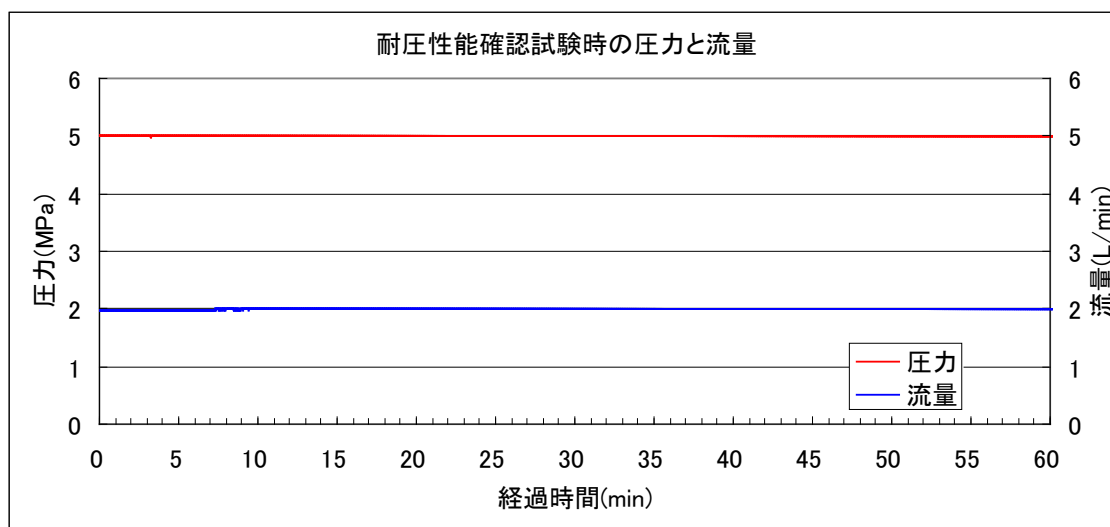


図 2.4-10 耐圧性能確認試験時の圧力・流量結果

表 2.4-2 耐圧性能確認試験結果一覧

部位	漏れの有無 (目視確認)	外観 (試験終了後)	検査結果
軸封部	無	異常無し	合格
ステータ連結部	無	異常無し	合格
プラグ部	無	異常無し	合格
吸い込み口	無	異常無し	合格
吐き出し口	無	異常無し	合格

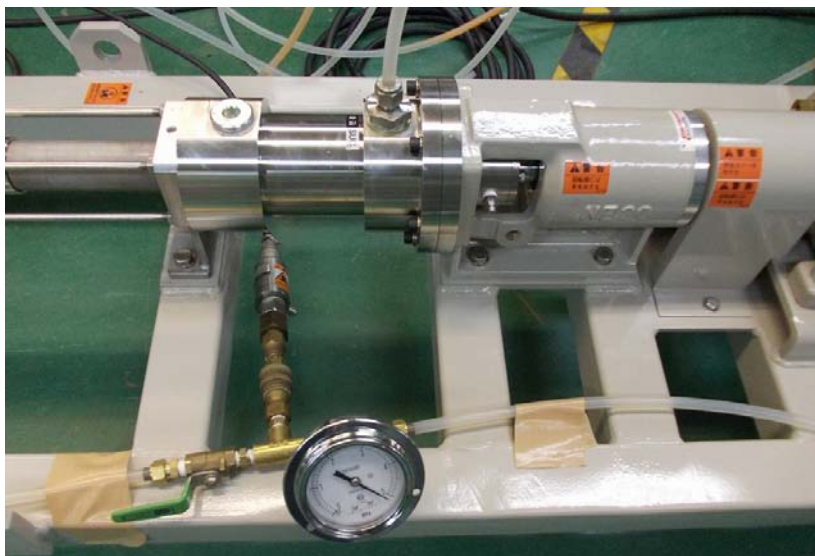


図 2.4-11 耐圧性能確認試験後ケーシング部写真



図 2.4-12 耐圧性能確認試験後 ステータ連結部（左写真）と軸封部（右写真）



図 2.4-13 耐圧性能確認試験後 プラグ部（左写真）と吸い込み口（右写真）

2.4.3.2 トレーサ濃度分散低減効果確認試験

トレーサ濃度分散低減効果確認試験では改良前と改良後で試験を行い、改良の効果を確かめるものである。濃度分散低減効果確認試験の概念図を図 2.4-14 に示す。

<試験方法>

- ① 無脈動ポンプを満水にする。また各ラインを水に置換しておく。
- ② トレーサタンクから無脈動ポンプ直前のバルブとの間をトレーサ水で置換しておく。
- ③ 設定流量で送水して流量計で確認する。
- ④ 流量一定を確認後にトレーサに切り替え濃度が一定になるまで計測する。
- ⑤ トレーサ濃度が一定になったら水に切り替える。
- ⑥ 再度濃度が一定になるまで計測する。また濃度一定後に採水を実施する。採水した溶液は試験後に無脈動ポンプを通さずに濃度測定を行う。
- ⑦ ④～⑥を3回繰り返す

またトレーサはウラニンと NaCl を混合して用いた。ウラニン濃度は 1ppm、NaCl 濃度は 0.3%とした。ウラニンは蛍光染料濃度計測器で蛍光染料濃度を測定し、NaCl 濃度は電気伝導度計 (EC 計) で電気伝導度 (EC) を測定し濃度に変換した。また無脈動ポンプの流量は 400mL/min 一定と 1000mL/min 一定の2種類の流量設定で実施した。なお蛍光染料濃度計測部は気泡の影響を受けるため、吸込みによる減圧で気泡が生じないようにトレーサタンクを 0.2MPa で加圧した。吐き出し側も蛍光染料濃度計測部の下流側にバルブを設けて絞り約 0.4MPa の圧力がかかるように調整した。濃度分散低減効果確認試験は改良前と改良後の2回実施して分散低減効果を確認したに試験状況を図 2.4-15 示す。

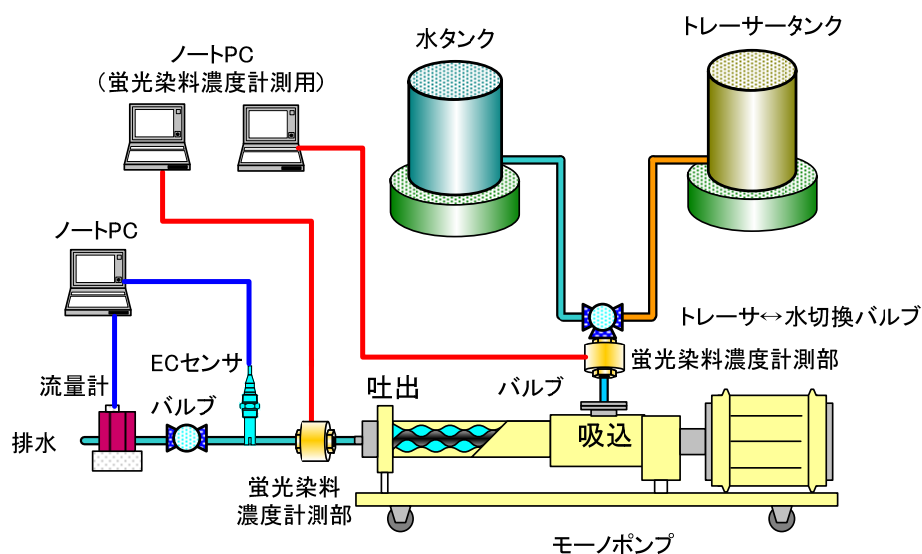


図 2.4-14 濃度分散低減効果確認試験構成の概念図

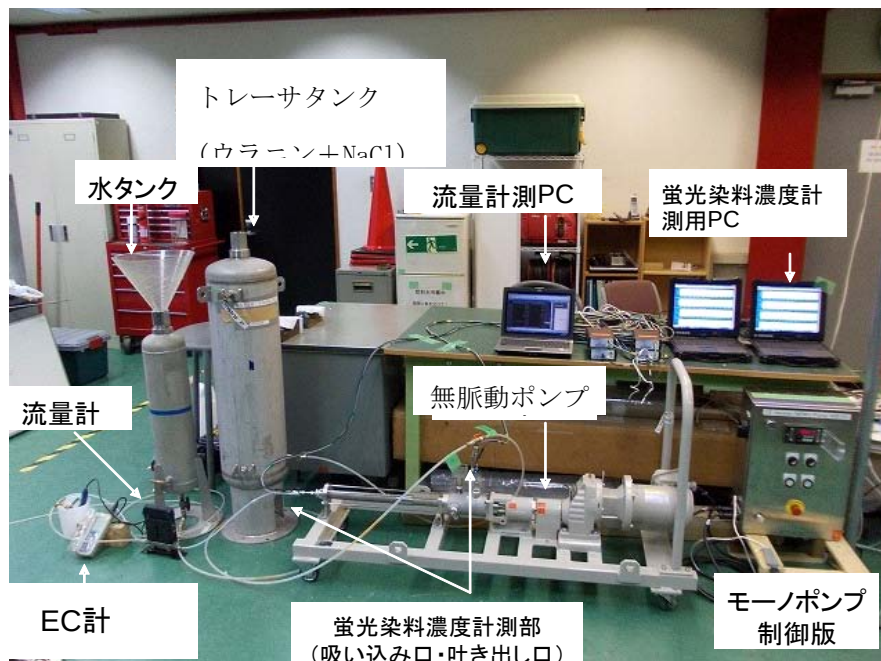


図 2.4-15 濃度分散低減効果確認試験状況

<改良前のトレーサ濃度分散結果>

図 2.4-16 に設定流量 400ml/min で実施した改良前の試験結果を示す。図では作成したトレーサのウランin 1ppm、NaCl の電気伝導度 5.84ms/cm を濃度 100%として表示した。試験は 3 回繰り返しており、試験別の詳細を図 2.4-17～図 2.4-19 に示した。各々の試験の経過時間はトレーサ・水切り替えバルブを操作し、トレーサを流し始めた瞬間を開始とした。試験結果からトレーサ水に切り替え後 5 分程度でほぼ濃度一定となった(濃度約 95%)。またその後は濃度上昇せず、開始から 25 分以上経っても濃度は変化しなかった。25 分以上経ってからの排水をサンプリングして無脈動ポンプを通さずに測定した結果も濃度 95%と試験中の濃度一定時と変わらなかった。原因としてはケーシングの吸い込み口より後端などに水が滞りやすい箇所があるため、トレーサと完全に置換されるには相当な時間がかかるものと思われる。

濃度一定後に水に切り替えた場合は濃度 0.1%までに約 7 分かかる結果となった。

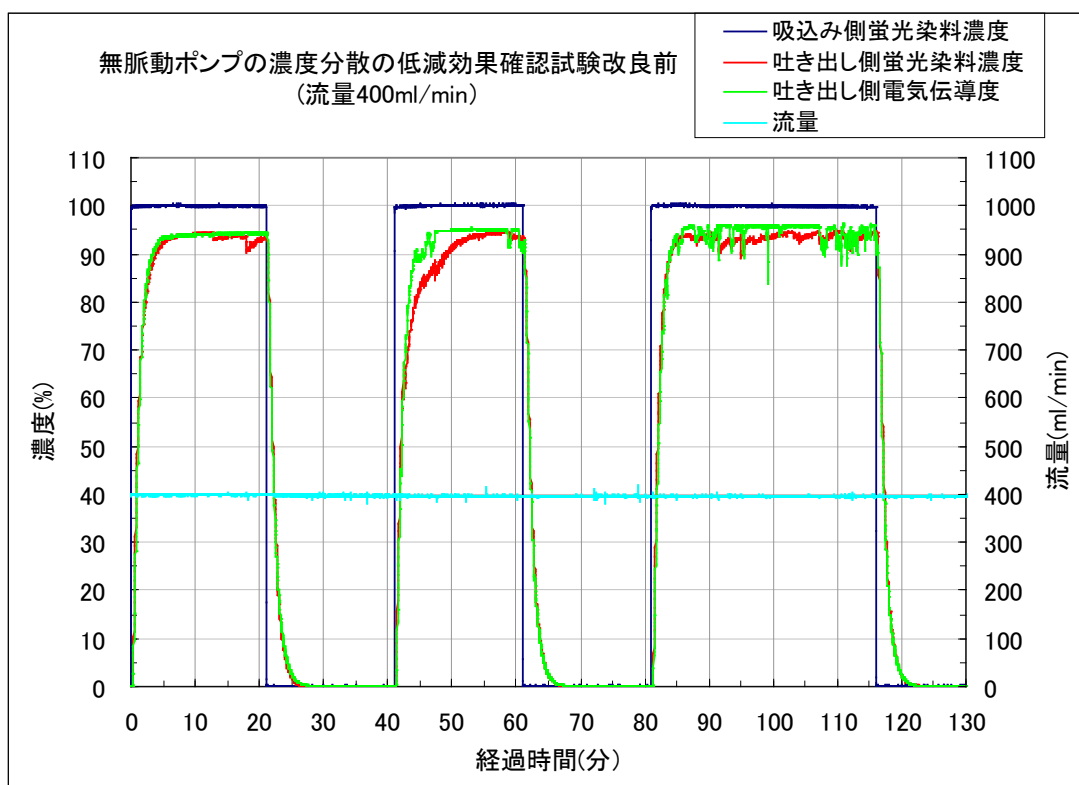


図 2.4-16 改良前濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 400ml/min)

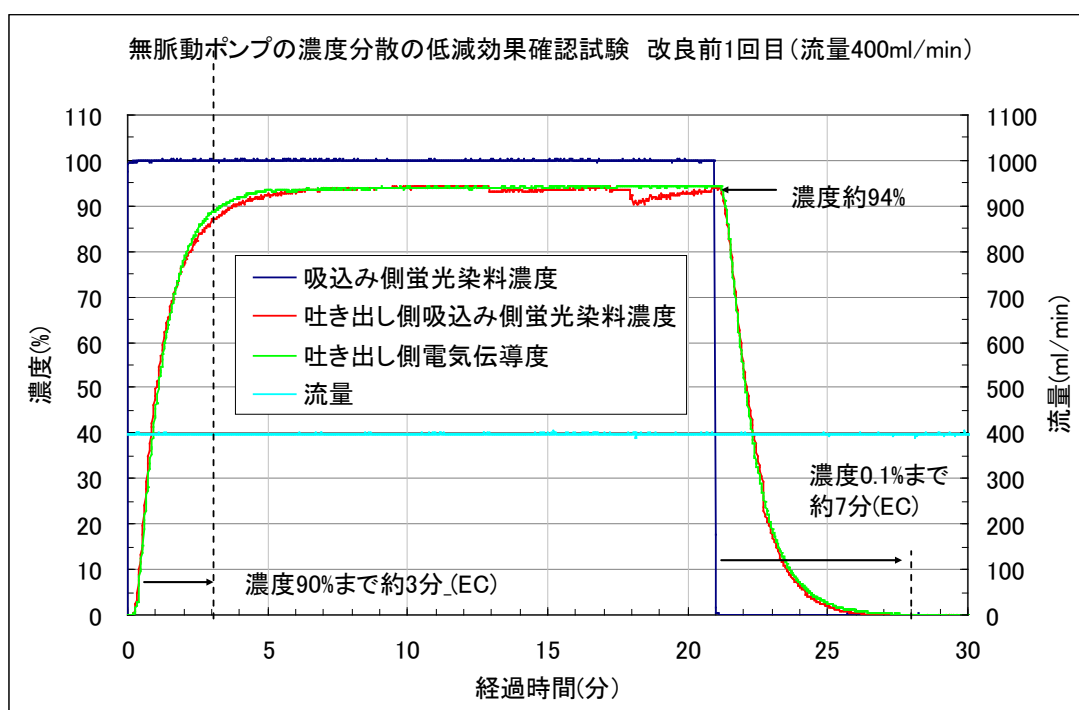


図 2.4-17 改良前濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 400ml/min 1 回目)

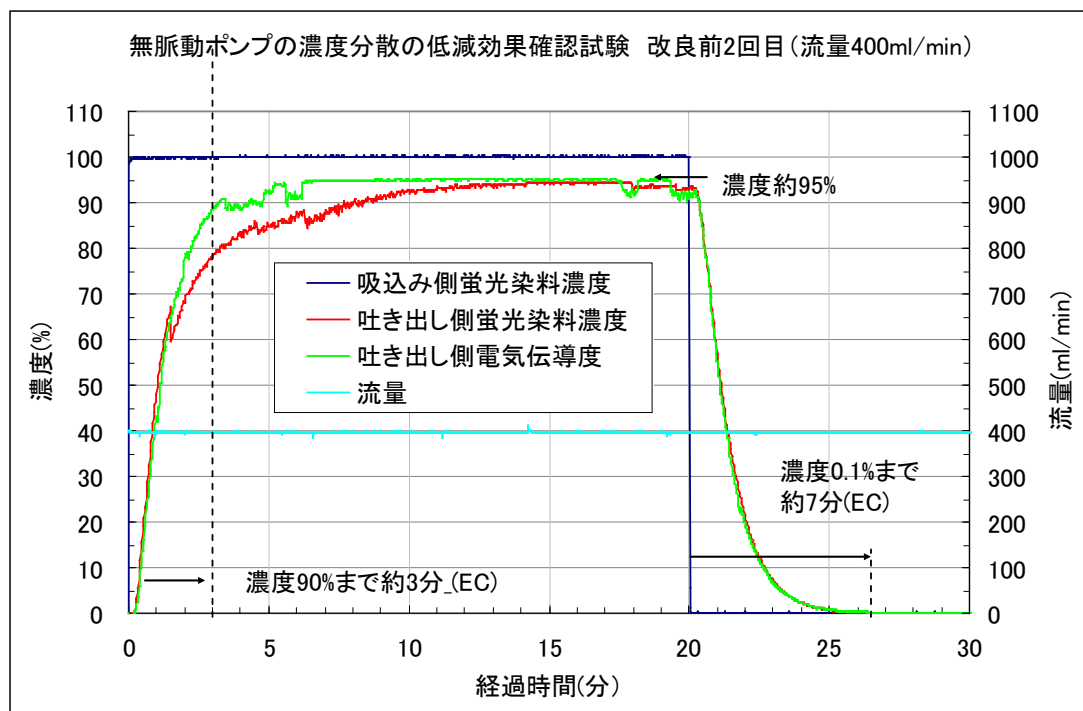


図 2.4-18 改良前濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 400ml/min 2 回目)

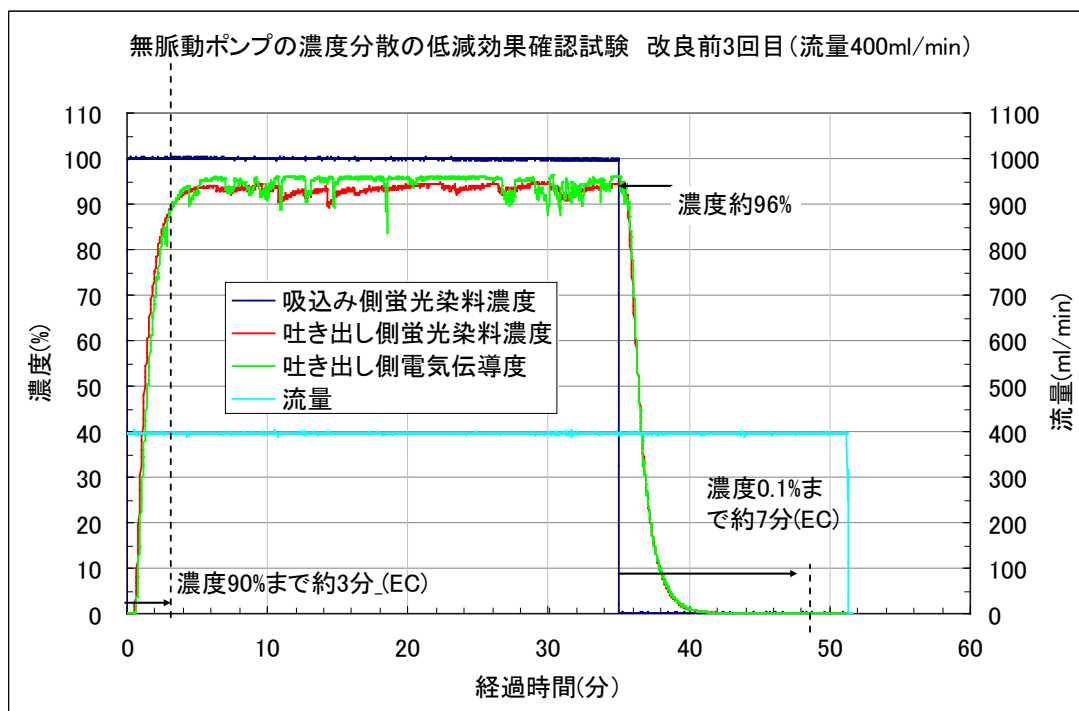


図 2.4-19 改良前濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 400ml/min 3 回目)

図 2.4-20 に設定流量 1000ml/min 時の試験結果を示す。図では作成したトレーサのウラニン 1ppm、NaCl の電気伝導度 5.88ms/cm を濃度 100%として表示した。試験は 3 回繰り返しており、試験別の詳細を図 2.4-21～図 2.4-23 に示した。試験結果からトレーサ水に切り替え後 1 分程度でほぼ濃度一定となった(濃度約 96%)。またその後は濃度上昇せず、開始から 10 分以上経っても濃度は変化しなかった。10 分以上経ってからの排水をサンプリングして無脈動ポンプを通さずに測定した結果も濃度 96%と試験中の濃度一定時と変わらなかった。原因としては 400ml/min と同様にケーシングの吸い込み口より後端など水が滞りやすい箇所があるため、トレーサと完全に置換されるには相当な時間がかかるものと思われる。

濃度一定後に水に切り替えた場合は濃度 0.1%までに約 3 分かかる結果となった。

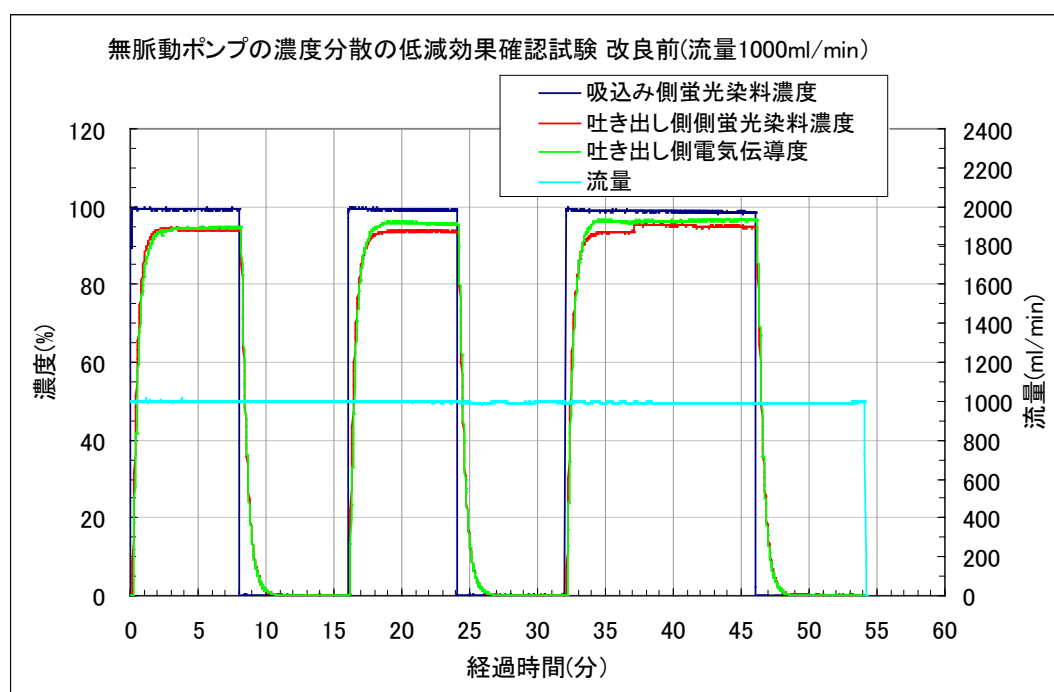


図 2.4-20 改良前濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 1000ml/min)

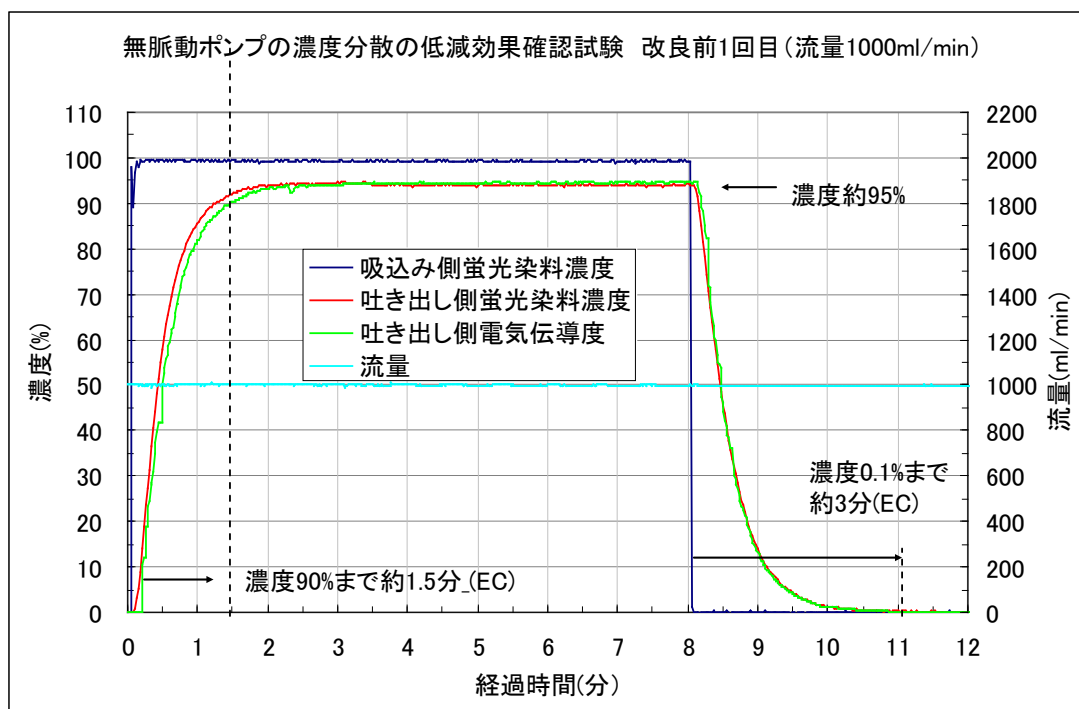


図 2.4-21 改良前濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 1000ml/min 1 回目)

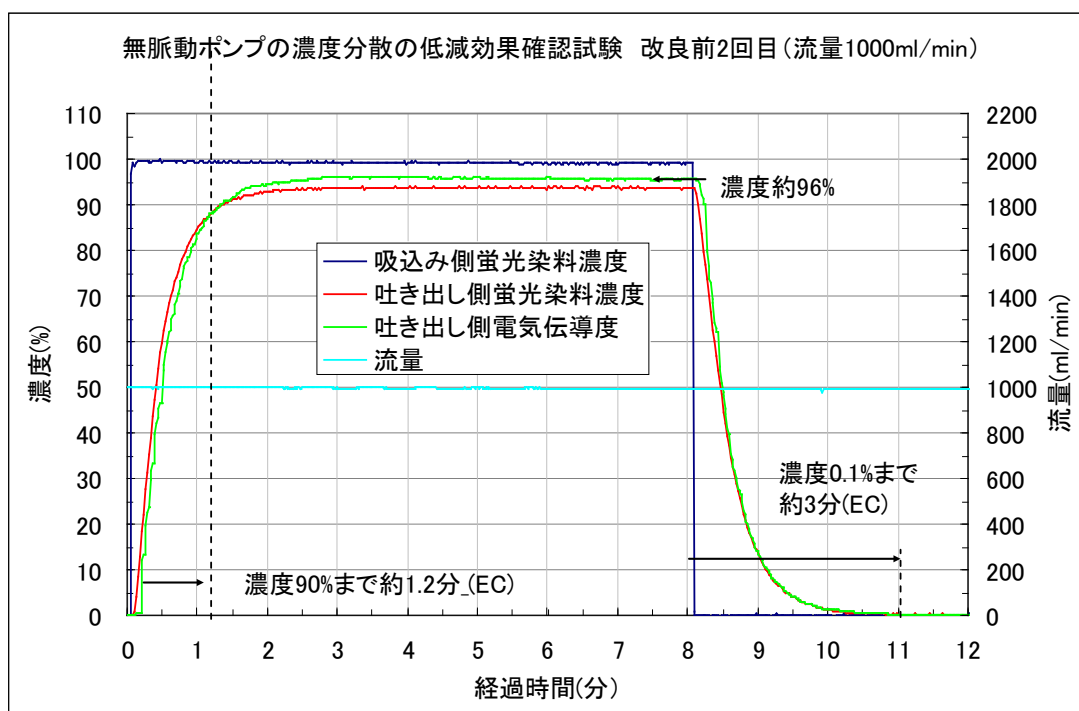


図 2.4-22 改良前濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 1000ml/min 2 回目)

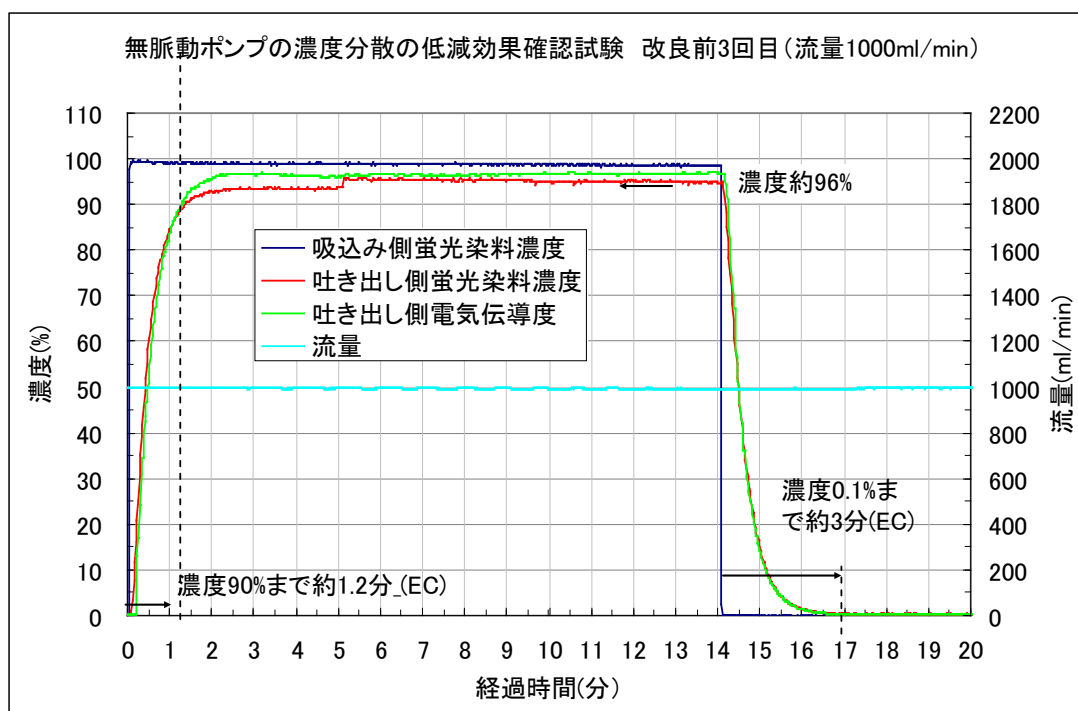


図 2.4-23 改良前濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ml/min 3 回目）

<改良後のトレーサ濃度分散結果>

図 2.4-24 に設定流量 400ml/min での改良後の試験結果を示す。図では作成したトレーサのウラニン 1ppm、NaCl の電気伝導度 5.64ms/cm を濃度 100%として表示する。試験は 3 回繰り返しており、試験別の詳細を図 2.4-25～図 2.4-27 に示した。試験結果からトレーサ水に切り替え後 1 分以内に濃度 90%以上に達して濃度 99%にも約 2.5 分で達した。その後試験により差があるが 3～4 分以内に濃度 100%に達しその後安定した。また水に切り替え後は 5 分程度でトレーサ濃度が 0.1%以下とほぼ水に置換された。ただし 2 回の試験では試験中の吐き出し圧の操作のためバルブを調整した時エアが発生し、EC 及び蛍光濃度測定結果に乱れが生じている。ただし水への切り替え前の EC 濃度は 100%であり 1 回目、3 回目の試験結果と変わらない。

結果より 25 分程度では 100%置換には至らなかった改良前と比較して改善後は 4 分以内には 100%トレーサに置換され、内容積の低減とトレーサが留まりやすかった構造を改良した効果を確認した。

また図 2.4-28 と図 2.4-29 に改良前後試験結果の比較結果を示す。図 2.4-28 は水→トレーサ切り替え時、図 2.4-29 はトレーサ→水切り替え時の比較結果である。経過時間はバルブ切り替え時を開始として示す。また図は各々 1 回目の試験結果で示す。比較結果から改良後は改良前と比較して曲線の勾配が急であり、置換の速度が速くなっていることが確認できる。また濃度一定となるのも改良前より早くなっており、改良前は完全には置換されなかったが改良後は完全に置換されたことを確認した。

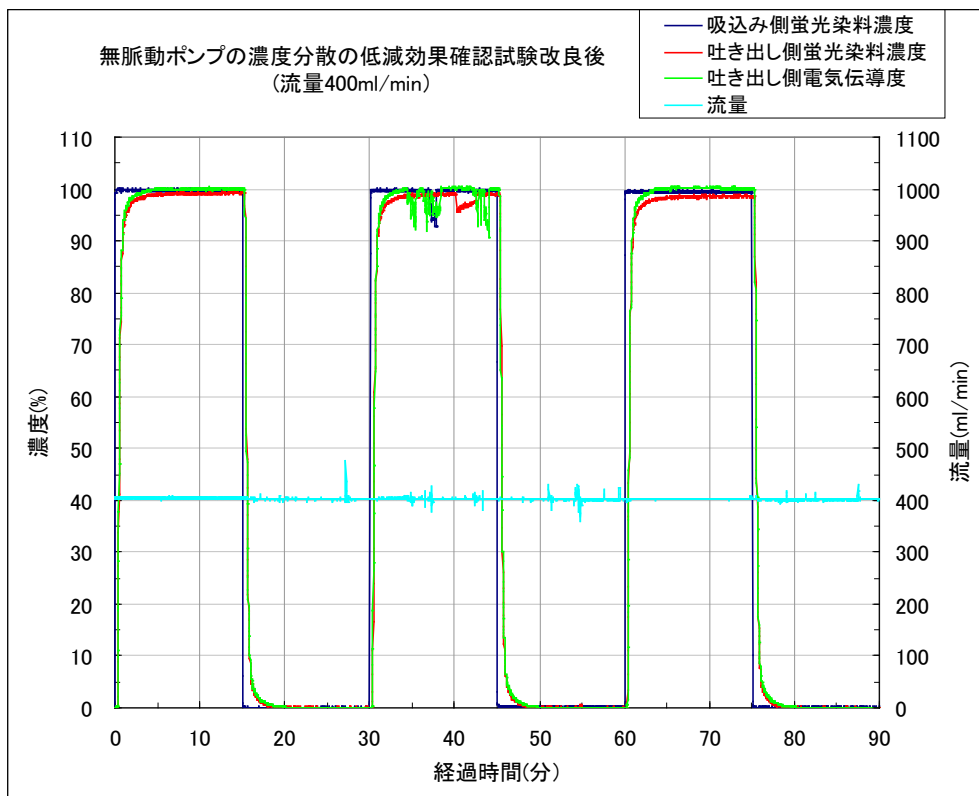


図 2.4-24 改良後濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 400ml/min)

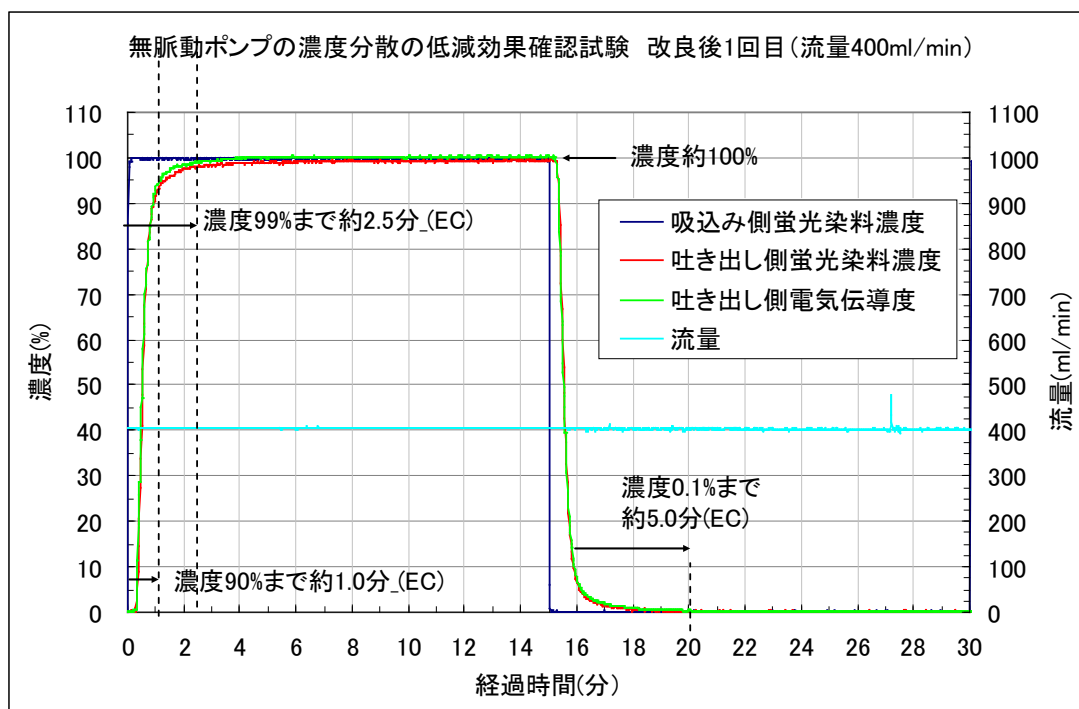


図 2.4-25 改良後濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 400ml/min 1 回目)

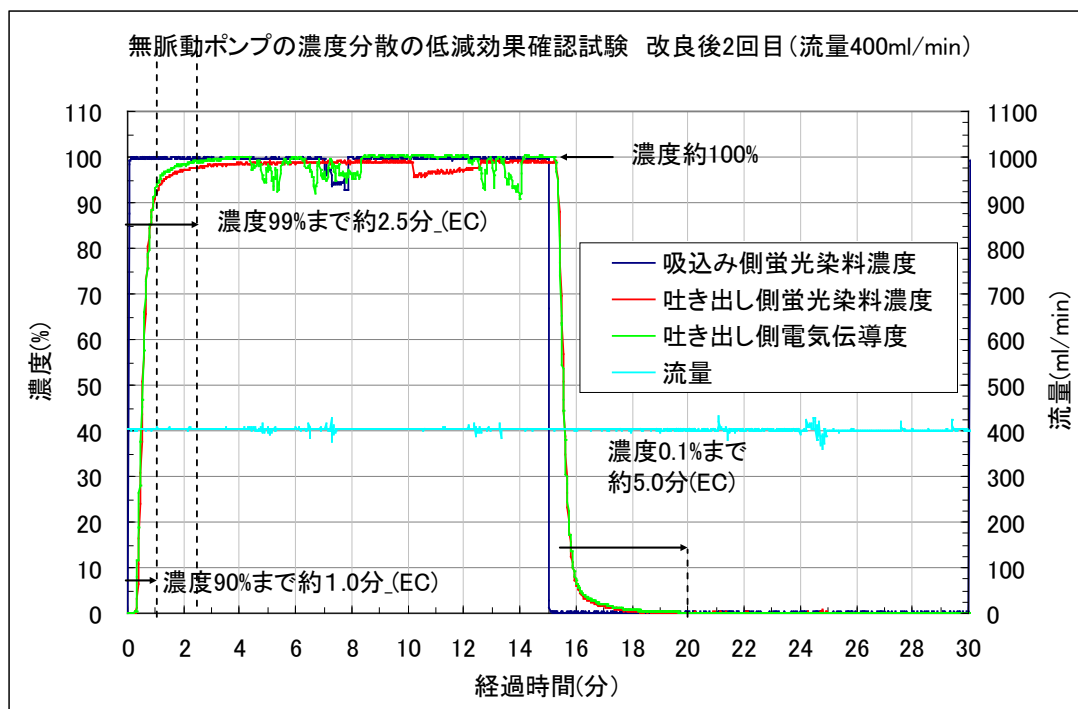


図 2.4-26 改良後濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 400ml/min 2 回目)

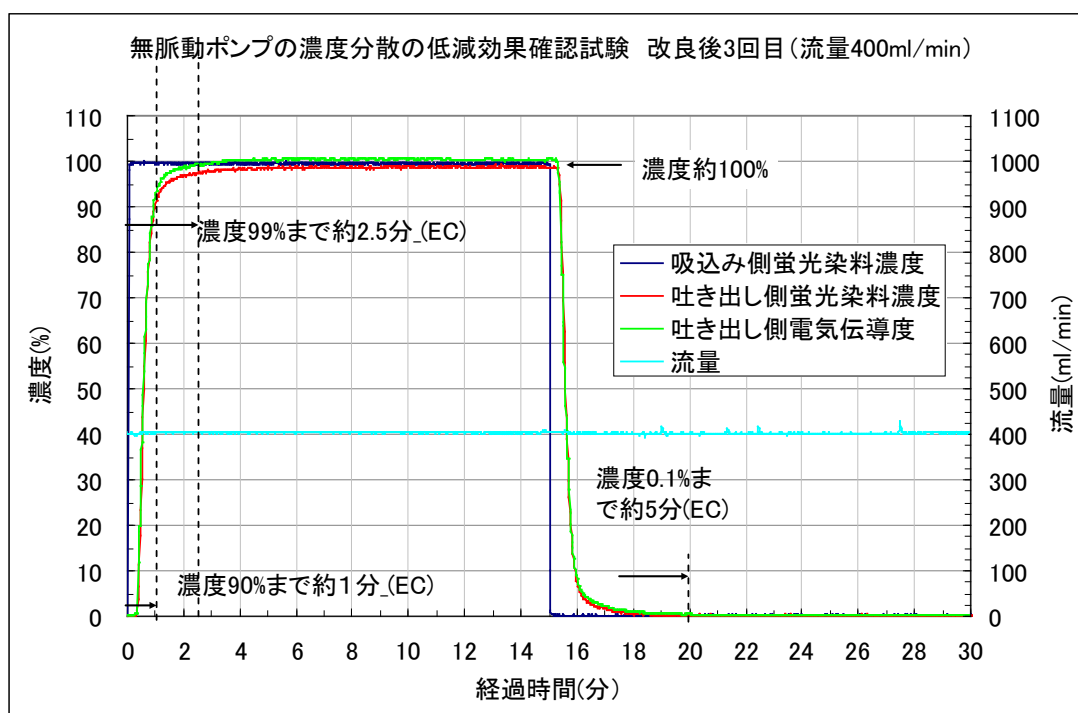


図 2.4-27 改良後濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 400ml/min 3 回目)

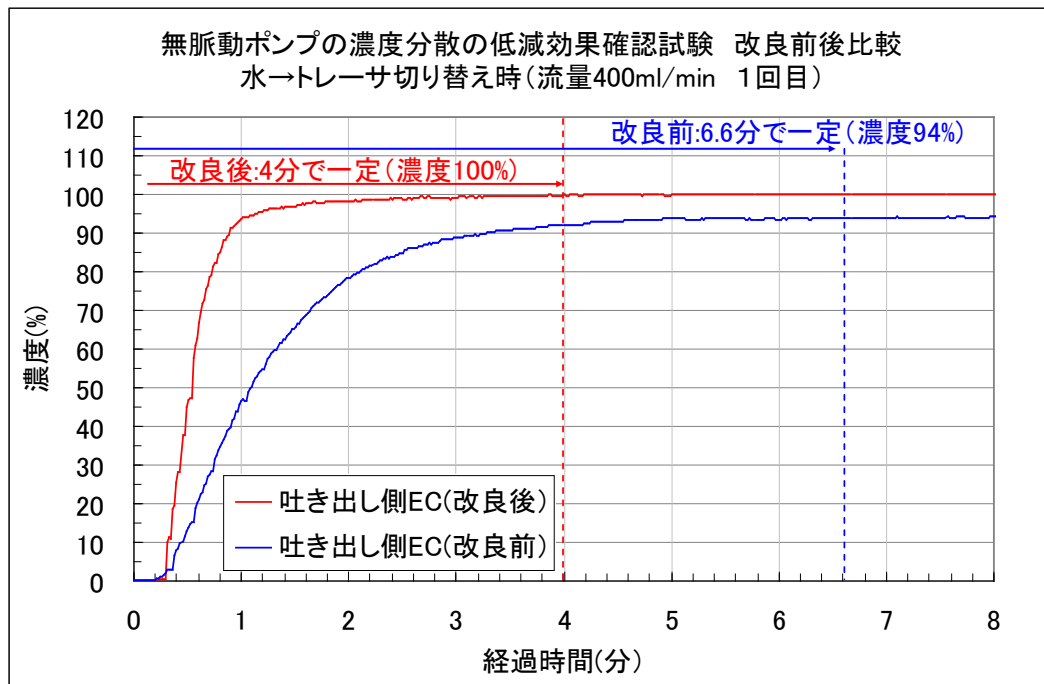


図 2.4-28 改良前後比較結果 (流量 400ml/min) 水→トレーサ切り替え時

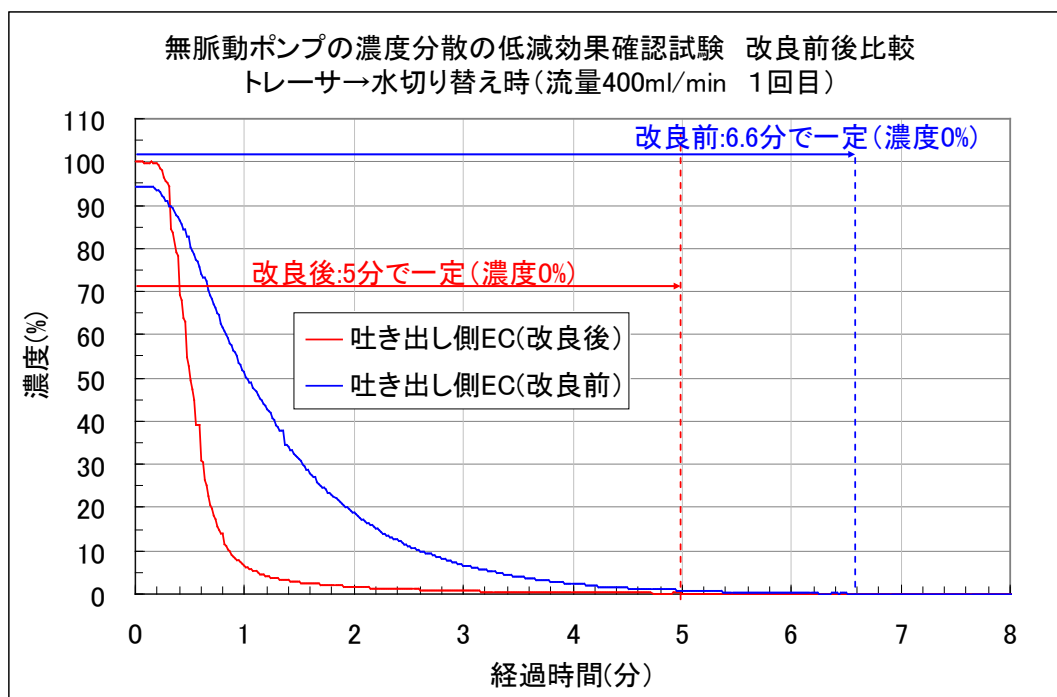


図 2.4-29 改良前後比較結果 (流量 400ml/min) トレーサ→水切り替え時

図 2.4-30 に設定流量 1000ml/min 時の試験結果を示す。図では作成したトレーサのウラニン 1ppm、NaCl の電気伝導度 5.64ms/cm を濃度 100%として表示する。試験は 3 回繰り返しており、試験別の詳細を図 2.4-31～図 2.4-33 に示した。試験結果からトレーサ水に切り替え後 0.5 分以内に濃度 90%以上に達して濃度 99%にも約 1 分で達した。その後試験により差があるが 2～3 分以内に濃度 100%に達しその後安定した。ただし 2,3 回目の試験では吸込み側蛍光濃度測定結果が 1ppm より若干低く出ているがサンプリング水の蛍光濃度測定結果が濃度約 100%と試験中の EC 測定結果と同じため気泡などの影響と考えられる。

結果より 10 分程度では 100%置換には至らなかった改良前と比較して改善後は 3 分以内には 100%トレーサに置換され、内容積の低減とトレーサが留まりやすかった構造を改良した効果を確認した。

また図 2.4-34 と図 2.4-35 に改良前後試験結果の比較結果を示す。図 2.4-34 は水→トレーサ切り替え時、図 2.4-35 はトレーサ→水切り替え時の比較結果である。経過時間はバルブ切り替え時を開始として示す。また各図は各々 1 回目の試験結果で示す。比較結果から改良後は改良前と比較して曲線の勾配が急であり、置換の速度が速くなっていることが確認できる。また濃度一定となるのも改良前より早くなっており、改良前は完全には置換されなかったが改良後は完全に置換されたことが確認できた。

改良前と改良後の結果を表 2.4-3 にまとめた。

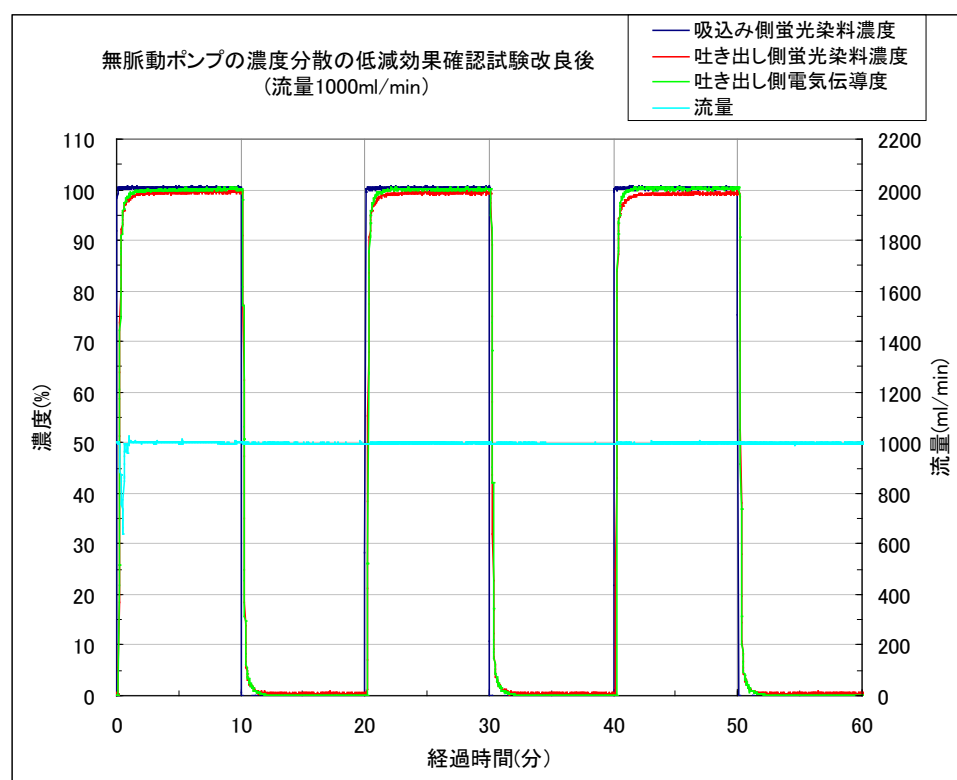


図 2.4-30 改良後濃度分散低減効果確認試験結果（流量 1000ml/min）

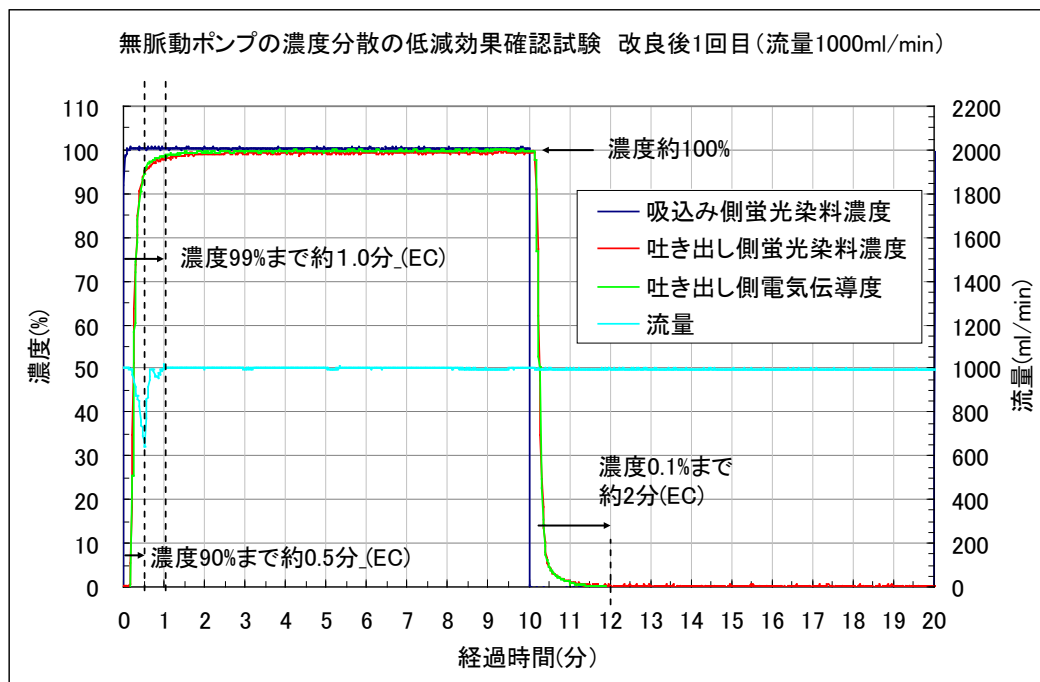


図 2.4-31 改良後濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 1000ml/min1 回目)

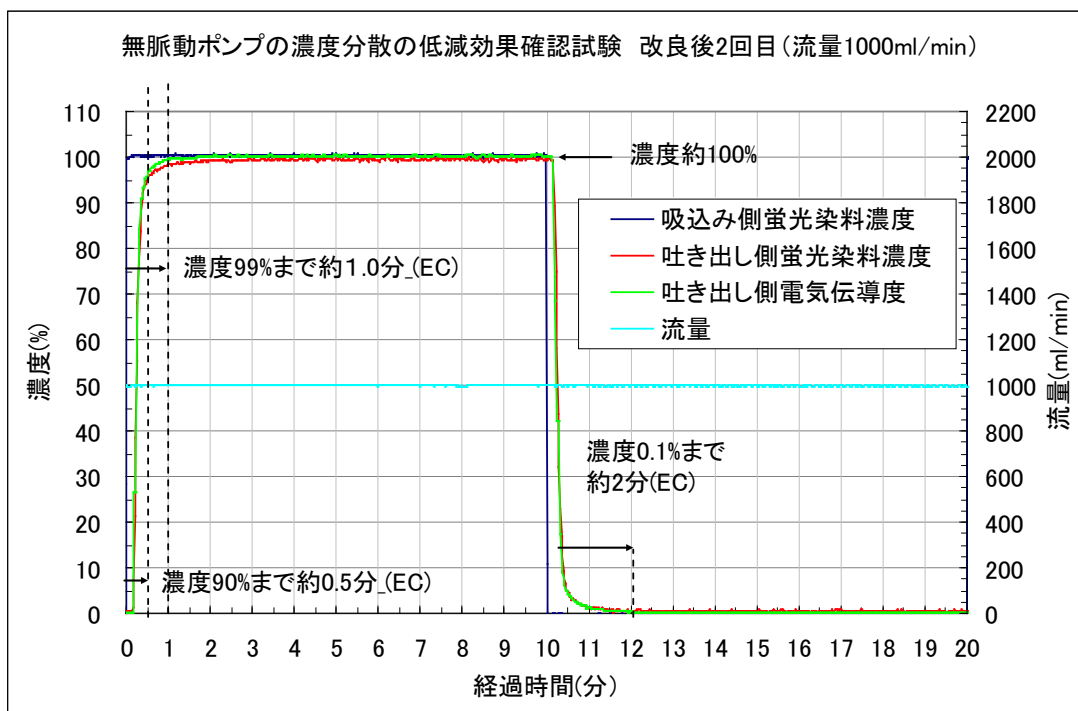


図 2.4-32 改良後濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 1000ml/min2 回目)

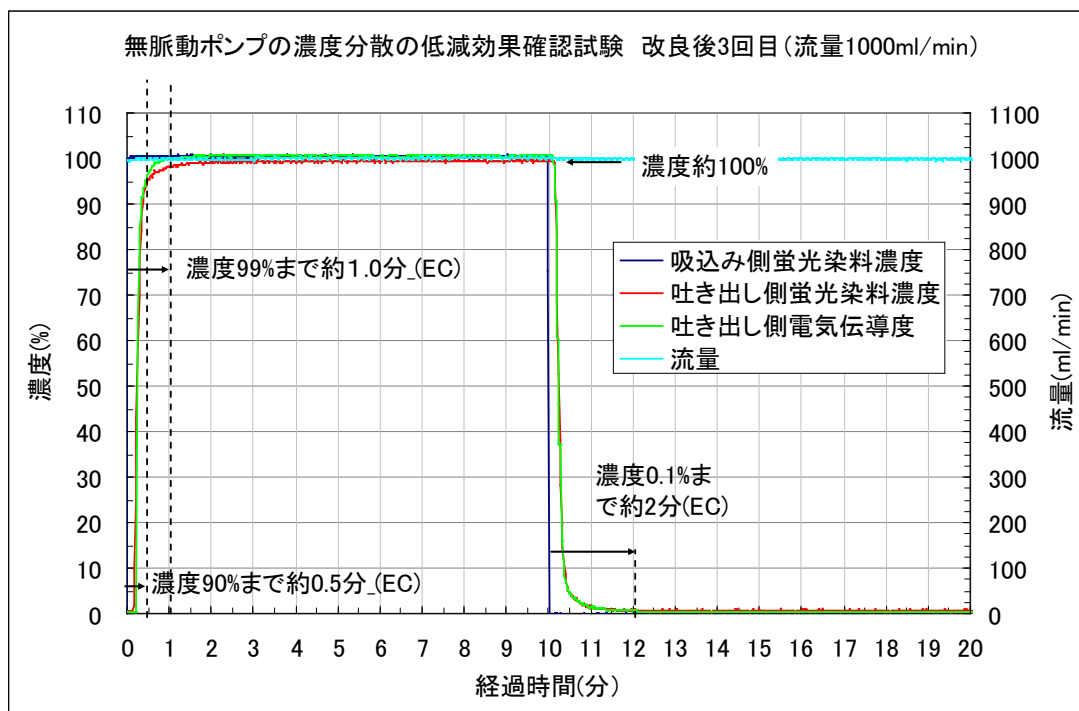


図 2.4-33 改良後濃度分散低減効果確認試験結果 (流量 1000ml/min 3 回目)

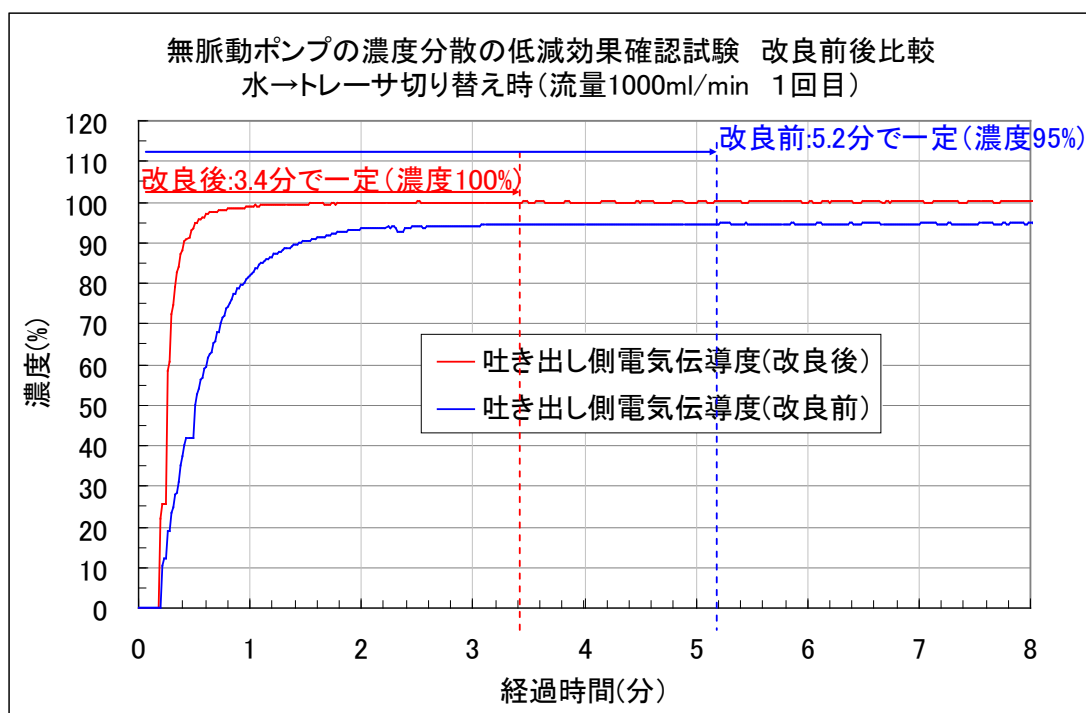


図 2.4-34 改良前後比較結果 (流量 1000ml/min) 水→トレーサ切り替え時

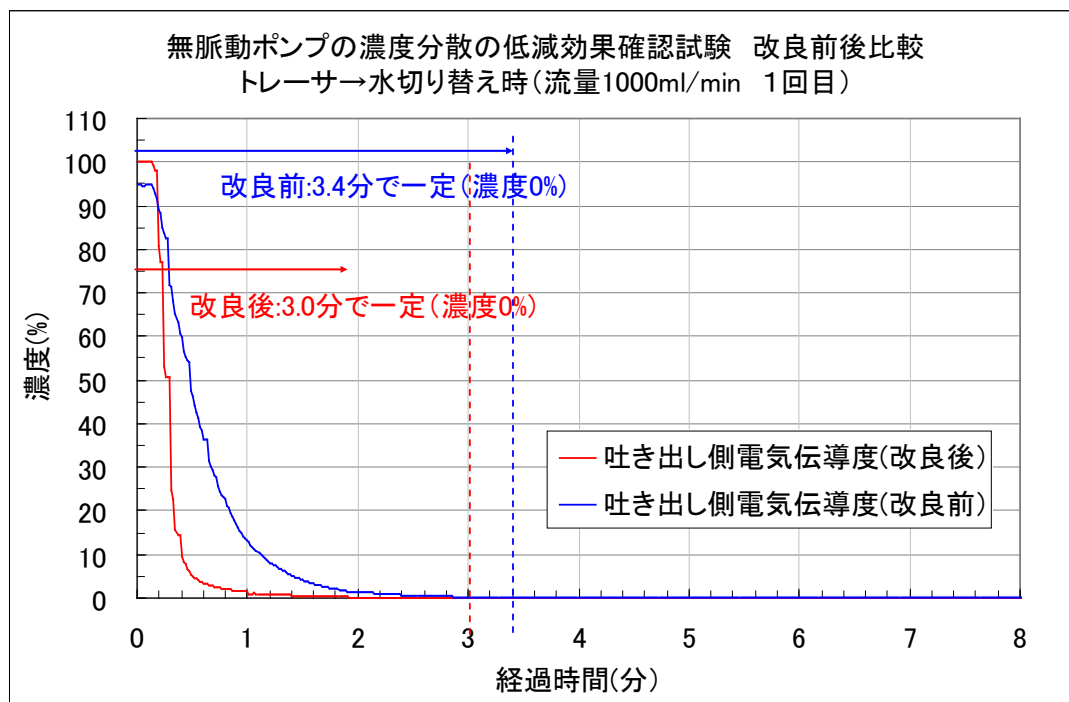


図 2.4-35 改良前後比較結果 (流量 1000ml/min) トレーサ→水切り替え時

表 2.4-3 濃度分散低減効果確認試験結果(平均)

設定流量 (mL/min)	装置	置換時間 (水→トレーサ)			トレーサ 置換時 最大濃度	置換時間 (トレーサ→水)
		濃度 90%まで	濃度 99%まで	濃度 100%で安定		0.1%以下で安定
400	改良前	2.9 分	—	—	95%	6.9 分
	改良後	0.9 分	2.4 分	3.5 分	100%	5.2 分
1000	改良前	1.3 分	—	—	96%	3.1 分
	改良後	0.4 分	0.9 分	1.9 分	100%	2.4 分

2.5 まとめ

- ・岩盤中での物質の移動を検討するトレーサ試験を行うために試作された装置に、原位置での試験に備えて改良を施し追加機器を試作した。改良や試作により、トレーサ試験装置の構成は図 2.1-1 に示す。
- ・トレーサ試験時に試験区間容積内の地下水をトレーサ溶液に置換するまでの時間を短縮するために、試験区間形成を 2 本のパッカーで遮水する既存方式から 1 本のパッカーの中心から注水と揚水が可能なポートを配した構造に変更した。
- ・試験区間長は、任意の長さに切断した伸縮性のメッシュ（円盤状のスペーサーをメッシュ間に挟む構造）をパッカー中心にあるポートに被せることで 5cm から 30cm まで設定できる構造とした。

今回実験したメッシュパターンでは、トレーサの置換速度から、ポリエステルメッシュ #5500 と外径 12mm、厚さ 1.5mm の Peek 材スペーサーを 3mm 間隔で配置するメッシュパターンが、最も効率良くトレーサを置換できることが判明した。

- ・岩盤への収着性を調べるため非放射性の Cs、Sr、Na に対するトレーサ試験区間に使用する材料への吸着試験では、市販品のポリエステルメッシュを使用する場合 Cs のみ吸着しないことが判明した。ポリエステルメッシュの材質を選んで製作することが可能であるため、Sr、Na 等のトレーサを使用する場合は、特注品として製作することが必要である。
- ・ボーリング孔径が拡大している深度でパッカーを拡張した場合にパッカーラバーが異常拡張して破損（H22 年度の原位置適応試験時において同構造のパッカーを使用した高粘性流体注入装置で発生）したことから、このような故障を回避するため、トレーサ注入部を形成するパッカーラバーの異常拡張を防止する必要がある場合に設置できる異常拡張防止金具とパッカーが破損した場合にいつでも現地で容易にパッカーラバーを交換できる構造とした。
- ・孔内装置内部に配置して注水区間の圧力を計測する圧力計と同様に揚水区間の圧力を計測する圧力計に対して容量 5MPa (2.5 倍) で精度が同等で且つ、分解能で 100 倍の高精度圧力計に交換した。
- ・圧力計の交換に伴う表示計、接続ケーブルおよびコンピュータのプログラムを変更した。
- ・無脈動ポンプをトレーサの循環試験に使用する場合、吸込側も吐出側も試験区間の環境圧力となるため、将来の国内での適用試験に向けて 5MPa の耐圧へ改造した。
- ・トレーサの循環試験において無脈動ポンプのポンプケーシング容積が大きい場合、トレーサ水の濃度がこのケーシング内で分散し試験精度を低下させることからポンプケーシング容積を現状のものから約 37% に容積を減少することができた。また、トレーサ濃度の分散低減効果確認試験において、改良前は完全に置換するには至らなかったが、改良後結果では流量 400ml/min では濃度 100% まで平均 3.5 分、改良後流量 1000ml/min では濃度 100% まで平均 1.9 分で完全に置換できるのを確認した。

3. ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

平成 20 年度から平成 22 年度の 3 年間のグリムゼルサイトにおいて、ラドンを用いた現位置試験により割れ目間隙幅の推定を行なった。このラドンを用いた推定では、平行平板で割れ目全体で均一な間隙幅を有する割れ目は、すなわち単一割れ目をモデルとして想定した。一方、試験対象とした割れ目は、ボーリングコア観察やボアホール TV 観察からは、断層であり一部で介在物を有すると考えられた。このため、割れ目の介在物がラドンによる割れ目の幅に与える影響を検討することを目的に、ラドンの室内試験を行なった。室内試験は粒径の異なる蛭川産の花崗岩を用いてラドンのフラックスの測定を行なった。

3.1 試験試料の分析

試験対象岩石の特性を明らかとしておくため、試験に用いた花崗岩の化学分析をラドンの計測に先立って実施した。この際、比較するためグリムゼルサイトの花崗岩も合わせて分析した。試数はグリムゼルCFRS09.001孔のコア 2 試料と試験用砕石 4 粒径である(図3.1-1)。これらの試料について、XRF による主要成分分析、ICP-MS (あるいはICP-AES) による微量成分分析をそれぞれ行った。分析に際して、表3.1-1のとおり分析試料名を付した。

表 3.1-1 分析試料一覧

受領時の試料名	コアの深度(m)	分析時の試料名
C-FRS 09.001	8.43～8.45	C-FRS09001
C-FRS 09.002	9.455～9.49	C-FRS09002
花崗岩砕石 9mm-11mm	—	GRT0911
花崗岩砕石 7mm-9mm	—	GRT0709
花崗岩砕石 5mm-7mm	—	GRT0507
花崗岩砕石 3mm-5mm	—	GRT0305



図 3.1-1 試料写真

3.2 分析方法

カナダにあるALS Canada Ltd. 社にて、以下の分析コード(パッケージ分析)を使用し、主要成分及び微量成分分析を行った。詳細は以下のとおりである。

(1)分析コード：ME-XRF06

試料数：6 試料

分析元素：SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃, TiO₂, MnO, P₂O₅, SrO, BaO, LOI

分析方法：粉末状にした試料について、ホウ酸リチウム（メタホウ酸リチウム：四ホウ酸リチウム＝ 50%：50%）を使用して溶融した後、ガラス試料を作成した。これを蛍光X 線分析法

(XRF) により試料を酸化物の形で分析した。

(2) 分析コード：MS-MS61

試料数：6 試料

分析元素：Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Cs, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr

分析方法：粉末状にした試料について、4種混合酸（塩酸・フッ化水素酸、硝酸、過塩素酸）にて溶解した後、酸溶液試料を作成した。これを誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）もしくは誘導結合プラズマ発光分析法（ICP-AES）により元素分析した。

(3) 分析コード：ME-MS81

試料数：6 試料

分析元素：Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Mo, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr

分析方法：粉末状にした試料について、ホウ酸リチウム（メタホウ酸リチウム：四ホウ酸リチウム＝80%：20%）を使用して熔融した後、ガラス試料を作成した。さらにこのガラス試料を再度粉末化し、酸溶液によって溶解したのちに酸溶液試料を作成した。これを誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）により元素分析した。

3.3 分析結果

主要成分（表3.3-1）、微量成分（表3.3-2および表3.3-3）の分析結果を一覧表に示した。全岩化学組成は、 SiO_2 がコア試料（C-FRS試料）で75wt%前後を示し、砕石試料（GRT試料）では76～77wt%と比較的高い値を示す。砕石の粒径による違いはいずれの試料において顕著に認められず、粒径による含有成分に差はないと考えられる。図3.3-1に $\text{CaO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 成分の三角ダイアグラム（CNK図）を示す。今回の6 試料を湯口ほか（2010）による土岐花崗岩体の分布範囲内にプロットされるが、砕石試料においてはCaにやや乏しい傾向がある。

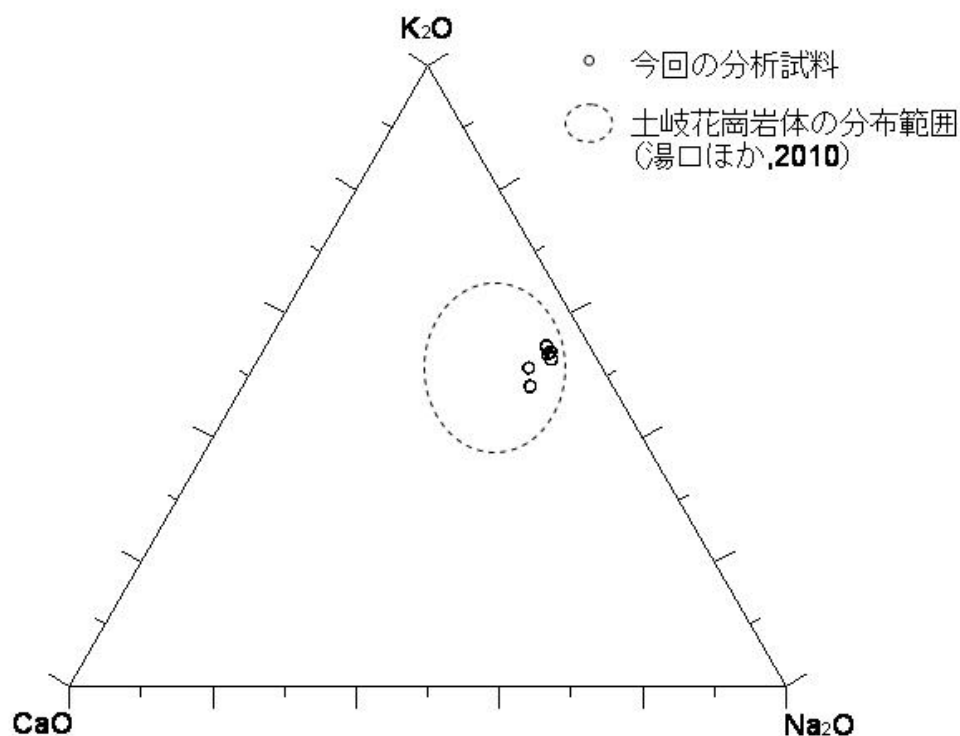


図 3. 3-1 試料の CNK 図

微量元素については、Ba やSr が同ジアルカリ土類金属のCa と同様に砕石試料（GRT試料）において乏しい傾向を示す。また、Zn 濃度も比較的低い。一方、Cs やGd、Rbなどの元素においては砕石試料（GRT 試料）の方がコア試料（C-FRS 試料）に比べて高い値を示す。

表 3. 3-1 主要成分の分析結果（ME-XRF06）

分析コード	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06	ME-XRF06
検出限界	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
単位	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SrO	BaO	LOI	Total
C-FRS09001	74.37	13.54	1.5	0.97	0.34	3.62	4.84	<0.01	0.2	0.02	0.04	0.01	0.04	0.33	99.82
C-FRS09002	75.34	13.1	1.45	1.04	0.33	3.6	4.34	<0.01	0.21	0.02	0.039	0.01	0.03	0.33	99.84
GRT0911	76.77	12.59	1.19	0.56	0.14	3.43	4.6	<0.01	0.07	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.48	99.86
GRT0709	76.89	12.63	1.09	0.56	0.12	3.53	4.56	<0.01	0.06	0.01	0.009	<0.01	0.01	0.52	100
GRT0507	76.66	12.91	0.99	0.53	0.12	3.55	4.76	<0.01	0.04	0.01	0.008	<0.01	0.01	0.43	100
GRT0305	76.17	13.14	1.05	0.55	0.12	3.53	4.94	<0.01	0.03	0.01	0.008	<0.01	0.01	0.48	100.05

表 3. 3-2 微量成分の分析結果 (ME-MS61) (1/4)

分析コード	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61
単位	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
成分	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs
C-FRS09001	9.05	6.08	0.7	430	2.98	0.08	0.64	<0.02	63	1.2	3	2.04
C-FRS09002	2.69	6	0.5	390	3.26	0.08	0.69	<0.02	50.6	1.1	2	1.98
GRT0911	2.48	6.01	2.2	120	4.22	0.32	0.42	<0.02	38.8	0.4	3	9.56
GRT0709	0.89	5.58	1.9	40	4.45	0.23	0.39	<0.02	41.1	0.4	2	9.68
GRT0507	0.4	5.87	1.8	30	5.43	0.24	0.38	<0.02	44.5	0.3	2	10
GRT0305	0.12	5.94	32.8	80	4.09	0.28	0.39	<0.02	35.9	0.4	1	9.9

表 3. 3-2 微量成分の分析結果 (ME-MS61) (2/4)

分析コード	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61
単位	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm
成分	Cu	Fe	Ga	Ge	Hf	In	K	La	Li	Mg	Mn	Mo
C-FRS09001	2.8	1.06	15.8	0.13	0.1	0.016	3.74	31.2	12.8	0.13	273	0.95
C-FRS09002	1.9	1.04	15.8	0.13	0.1	0.016	3.44	25.6	14	0.13	274	0.92
GRT0911	2.5	0.89	19.35	0.13	4.4	0.031	3.61	17.1	72.8	0.02	172	0.18
GRT0709	1.9	0.77	18.9	0.12	4.2	0.026	3.54	17.2	67.7	0.01	158	0.12
GRT0507	1.3	0.73	19.3	0.11	3.7	0.025	3.64	18.9	69.8	0.01	148	0.11
GRT0305	1.5	0.75	19.75	0.12	3.9	0.026	3.8	15.1	69.1	0.01	154	0.15

表 3. 3-2 微量成分の分析結果 (ME-MS61) (3/4)

分析コード	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61
単位	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
成分	Na	Nb	Ni	P	Pb	Rb	Re	S	Sb	Sc	Se	Sn
C-FRS09001	2.5	14.4	0.9	160	18.2	182.5	<0.002	0.01	4.27	1.8	1	3.3
C-FRS09002	2.54	14.7	0.8	160	16	171	<0.002	0.01	0.84	1.7	1	3.4
GRT0911	2.4	16.6	0.7	20	71.3	359	<0.002	0.01	1.04	2.6	1	4.1
GRT0709	2.4	16.5	0.4	20	69.3	354	<0.002	<0.01	0.61	2.5	1	4.1
GRT0507	2.41	15.3	0.4	20	31.4	378	<0.002	<0.01	0.41	2.5	1	4
GRT0305	2.46	19	0.4	20	33.1	379	<0.002	0.01	0.28	2.3	1	3.9

表 3. 3-2 微量成分の分析結果 (ME-MS61) (4/4)

分析コード	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61	ME-MS61
単位	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
成分	Sr	Ta	Te	Th	Ti	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr
C-FRS09001	111.5	1.56	<0.05	29.9	0.09	0.85	8	7	0.5	24.3	24	1.2
C-FRS09002	115	1.53	<0.05	24.7	0.093	0.78	7.1	6	0.5	21.6	23	0.9
GRT0911	12.2	2.46	<0.05	33.8	0.018	1.78	8.9	1	3.5	70.5	15	81.9
GRT0709	10.7	2.5	<0.05	32.5	0.016	1.78	8.9	<1	4.3	75.9	15	78.4
GRT0507	11.1	2.29	<0.05	37	0.015	1.83	8.6	<1	4	66.3	14	74.7
GRT0305	15.2	2.2	<0.05	28.7	0.014	1.9	7.9	1	4.5	61	14	76

表 3.3-3 微量成分の分析結果 (ME-MS81) (1/3)

分析コード	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
単位	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
成分	Ba	Ce	Co	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf
C-FRS09001	439	63.4	1.2	<10	2.13	3.84	2.58	0.7	15.5	3.61	3.7
C-FRS09002	384	58.8	1.1	<10	1.9	3.05	2.1	0.65	14.9	3.12	3.2
GRT0911	23.9	41	0.5	<10	9.15	10.65	7.11	0.07	18.6	8.08	5
GRT0709	16	42	<0.5	<10	9.03	11.85	8.13	0.08	18.5	8.92	6
GRT0507	18.8	35.5	<0.5	<10	9.39	9.05	6.22	0.07	18.9	7	4.5
GRT0305	35.6	37.6	<0.5	<10	9.31	8.48	5.75	0.08	18.9	6.51	5.3

表 3.3-3 微量成分の分析結果 (ME-MS81) (2/3)

分析コード	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
単位	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
成分	Ho	La	Lu	Mo	Nb	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr
C-FRS09001	0.85	30.9	0.47	<2	14.6	24.4	7.13	188	4.63	3	115.5
C-FRS09002	0.67	28.3	0.41	<2	14	22.3	6.71	171	4.02	3	117.5
GRT0911	2.47	16.7	1.17	<2	16	21.9	5.48	369	7.12	15	11.2
GRT0709	2.75	17.1	1.35	<2	16	22.6	5.7	372	7.45	5	9.9
GRT0507	2.08	15	1.02	<2	14.6	19.2	4.78	389	6.19	6	10
GRT0305	2.01	15.6	0.95	<2	13.8	19.4	4.98	394	6.06	13	13.2

表 3.3-3 微量成分の分析結果 (ME-MS81) (3/3)

分析コード	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
単位	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
成分	Ta	Tb	Th	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr
C-FRS09001	1.7	0.6	24.6	0.7	0.42	7.58	8	1	24.6	2.95	115
C-FRS09002	1.6	0.51	24	0.7	0.35	7.03	8	1	20.1	2.52	101
GRT0911	2.7	1.6	35.6	1.5	1.11	8.94	<5	4	68.4	7.41	91
GRT0709	2.8	1.73	36.2	1.6	1.25	10.05	<5	5	75.6	8.41	105
GRT0507	2.5	1.36	46.5	1.6	0.95	10.05	<5	5	59.3	6.53	81
GRT0305	2.4	1.28	28.9	1.6	0.9	8.3	<5	5	56.1	6.12	97

今回の試料について、希土類元素14 元素 (La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu) についてコンドライト規格化図を作成した (図3.3-2)。規格化には、Taylor & McLennan (1985) のコンドライト値を採用した。コア試料 (C-FRS試料) は日本の花崗岩と同様、軽希土類 (左側) に富み、Eu 負異常で特徴付けられる。一方、砕石試料 (GRT 試料) はコア試料 (C-FRS 試料) に比べてEu 含有量が一桁小さく、希土類パターン図において極めて顕著なEuの 負の異常を示している。また、Gd 以降、緩やかな右上がりのパターンを示し、重希土類に富むという特徴が見られる。

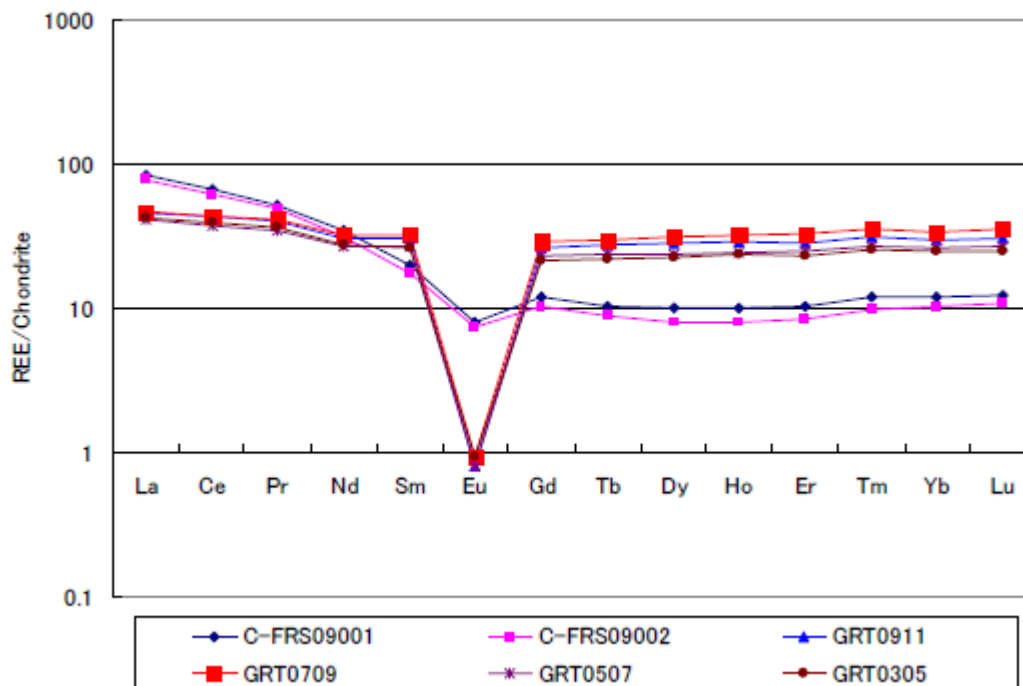


図 3.3-2 試料の希土類パターン（コンドライト規格化図）

表3.3-4に、希土類元素濃度の合計を示した。LREE（軽希土類）はLa～Eu までの合計、HREE（重希土類）はGd～Lu までの合計、 Σ REE はLREE とHREE の合計である。

ただし、一般的に希土類元素に属するSc とY は合計に含んでいない。総希土類濃度（ Σ REE）は110～150ppm と総じて低い。また、LREE/HREE 比はコア試料（C-FRS試料）で9前後と高く、比較的軽希土類に富む。これに対し、砕石試料（GRT 試料）では2～3 と低い値を示し、比較的重希土類に富んでいる。

表 3.3-4 試料の希土類元素濃度（単位は ppm）

希土類元素	LREE	HREE	LREE/HREE	ΣREE
C-FRS09001	131.2	15.3	8.6	146.5
C-FRS09002	120.8	12.7	9.5	133.5
GRT0911	92.3	39.6	2.3	131.9
GRT0709	94.9	44.4	2.1	139.3
GRT0507	80.7	34.2	2.4	115.0
GRT0305	83.7	32.0	2.6	115.7

LREE : La～Eu の合計, HREE : Gd～Lu の合計,
ΣREE : LREE と HREE の合計

図3.3-3にLREE（軽希土類）とY、HREE（重希土類）とY の相関図を示した。一般に、Y(イットリウム)は重希土類元素と相関が高いと言われるが、本試料についてもその傾向が見られる。

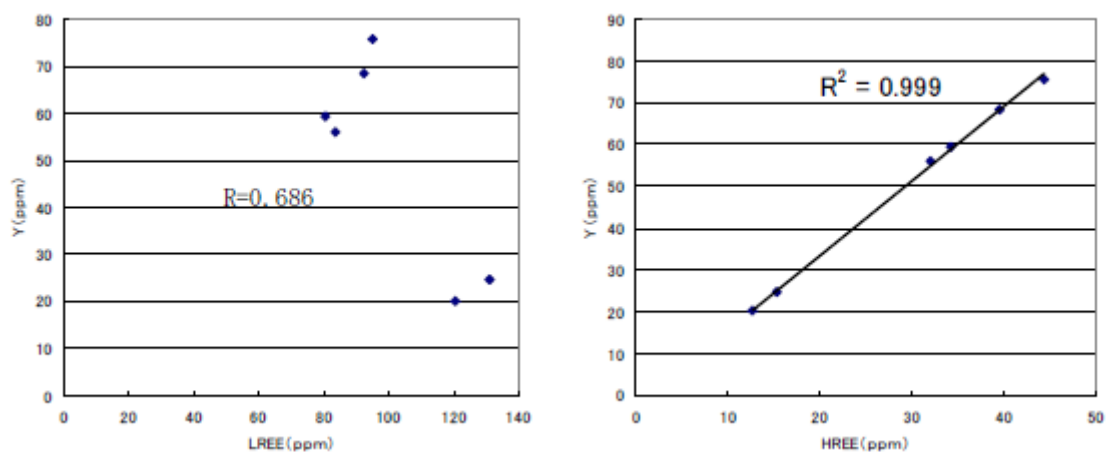


図 3.3-3 試料の希土類元素相関

(左 : LREE vs Y, 右 : HREE vs Y)

3.4 試料の物性

ラドン発生試験の試料の岩石物性を得るため、粒径の異なる4試料の碎石（粒径3mm-5mm、粒径5mm-7mm、粒径7mm-9mm、粒径9mm-11mm）の比表面積、間隙径分布を求めた。

3.4.1 比表面積

3.4.1.1 比表面積の測定方法

比表面積はBET一点法により算出した。測定は窒素とヘリウムの混合ガス（N₂ 30%、He70%）を使用した。測定装置内において、混合ガスの連続的な流れの中でサンプルが入ったU型セルをセットし、セル部を液体窒素温度に冷却すると、混合ガス中の窒素がサンプル表面に吸着され、混合ガスの流れの中で窒素ガス濃度が減少する。一定量のガスが吸着すると平衡状態となるが、この時の窒素ガスの減少を熱伝導度検出器を用いて測定する。次に吸着平衡に達したセル部を常温に戻すと窒素ガスの脱離が始まる。この場合、一定の混合ガスはサンプルセル内の流れの中で窒素濃度が増加する。この脱離した窒素ガス量を吸着時同様、熱伝導度検出器を用いて測定した。測定試料は碎石を更に平均粒径1.34mmおよび平均粒径0.64mmに粉砕、調整したものを用いた。

3.4.1.2 比表面積の測定結果

表3.4-1にBET一点法で求めた比表面積測定結果を示す。碎石の粒径毎の乾燥前、乾燥後、計測後における比表面積に顕著な差は認められない。一方、粉体粒径サイズの比較では各碎石の粒径ともに、粉体粒径1.34mmが0.64mmより大きい傾向がある。また、碎石の粒径サイズで比較すると比表面積の粉体粒径1.34mmにおいて乾燥後の比表面積は0.63-0.95m²/g、粉体粒径が0.64mmにおいて比表面積は0.58-0.63 m²/gの範囲にあり、粒径サイズに関わらず碎石の粒径が小さくなると、比表面積がやや大きくなる傾向が認められる。

表 3.4.1-1 比表面積測定結果

サンプル名	粉体粒径 (mm)	脱着過程						
		全表面積	乾燥前		乾燥後		測定後	
		平均 (m ²)	岩石 (g)	比表面積 (m ² /g)	岩石 (g)	比表面積 (m ² /g)	岩石 (g)	比表面積 (m ² /g)
碎石 φ9mm-11mm	1.34	0.636	1.0141	0.6267	1.0087	0.6300	1.0175	0.6246
碎石 φ7mm- 9mm		0.761	1.0143	0.7498	1.0091	0.7536	1.0139	0.7501
碎石 φ5mm- 7mm		0.696	1.0322	0.6738	1.0262	0.6777	1.0378	0.6702
碎石 φ3mm- 5mm		0.974	1.0257	0.9491	1.0206	0.9539	1.0245	0.9502
碎石 φ9mm-11mm	0.64	0.589	1.0204	0.5767	1.0167	0.5788	1.0201	0.5769
碎石 φ7mm- 9mm		0.627	1.0288	0.6094	1.0234	0.6127	1.0276	0.6102
碎石 φ5mm- 7mm		0.600	1.0228	0.5866	1.0187	0.5890	1.0227	0.5867
碎石 φ3mm- 5mm		0.645	1.0219	0.6312	1.0172	0.6341	1.0285	0.6271

3.4.2 間隙分布

3.4.2.1 間隙分布の測定方法

間隙分布は水銀ポロシメータによって測定した。水銀ポロシメータは水銀の大きな表面張力を用いて、水銀の注入圧と試料中の間隙の直径との相関関係を利用し、細孔径分布として測定するものである。また、細孔分布とともに比表面積、気孔率（間隙率）および密度（真密度）も合わせて測定が可能である。間隙分布（細孔分布）の測定は当所が所有する島津製作所の PoreSizer9320 を使用した。本装置では粒径の小さい試料は測定の誤差が大きくなるため、砕石試料のなかで最も大きい径 9mm-11mm の 4 試料（H91001～H91004）を用いて測定を行なった。

3.4.2.2 間隙分布の測定結果

水銀圧入法による間隙径分布の測定結果を図 3.4-1、図 3.4-2、図 3.4-3、図 3.4-4 に示す。気孔率は 0.48%～1.47%の範囲で得られている。特に図 3.4-3 に示した試料の気孔率が小さくが、その原因としてこの試料を構成する石英などの造岩鉱物が大きい傾向にあり、主な間隙構造である鉱物粒界が相対的に少なくなっているためと推察された。図 3.4-3 の試料において全細孔体積や表面積が小さい理由も造岩鉱物が大きいためと考えられる。このため、ラドン発生試験時はペグマタイとなどの造岩鉱物が大きい部分を取り除いて試験に供した。

表 3.4.2-1 間隙分布（細孔分布）の測定結果

サンプル名	単位	H91101	H91102	H91103	H91104
かさ密度	g/cc	2.6099	2.5537	2.5720	2.5694
真密度	g/cc	2.6405	2.5920	2.5845	2.5941
気孔率（間隙率）	%	1.1591	1.4790	0.4817	0.9518
全細孔体積	cc/g	0.0044	0.0058	0.0019	0.0037
全細孔表面積	m ² /g	0.0962	0.1432	0.0628	0.0751
メディアン径（体積基準）	μm	0.3217	0.2910	0.2891	0.3986
メディアン径（表面積基準）	μm	0.0879	0.0814	0.0522	0.0794
平均細孔直径(4V/A)	μm	0.1848	0.1618	0.1193	0.1972
モード径（体積基準）	μm	0.1303	0.3351	0.0636	0.4168
モード径（表面積基準）	μm	0.0796	0.0475	0.0415	0.0490

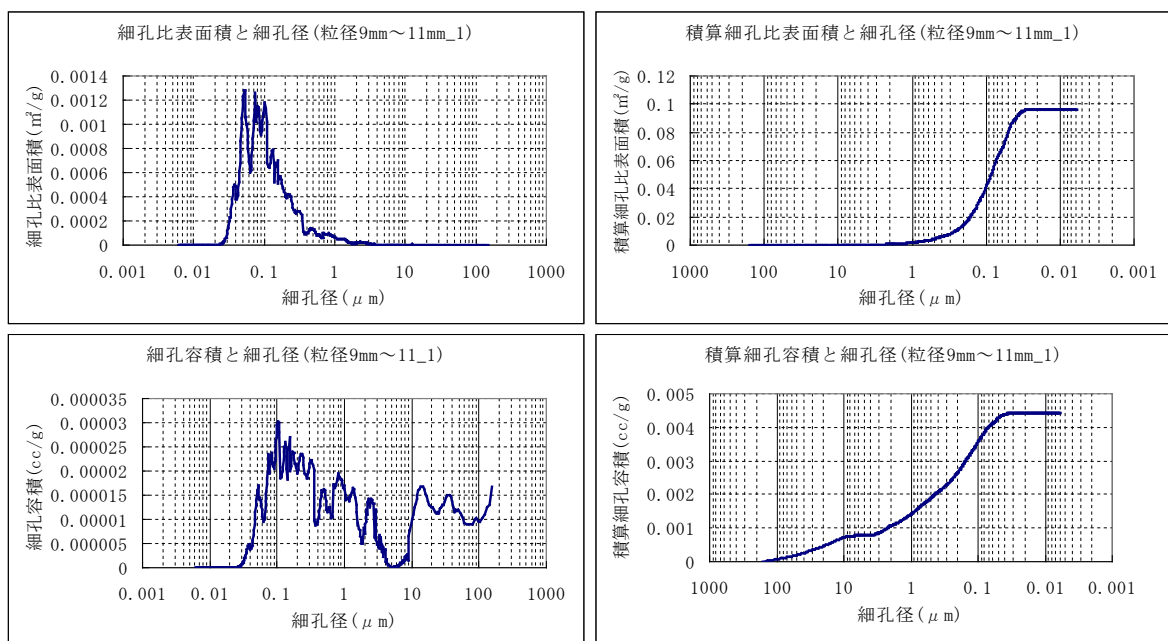


図 3.4-1 間隙径分布 (試料 1)

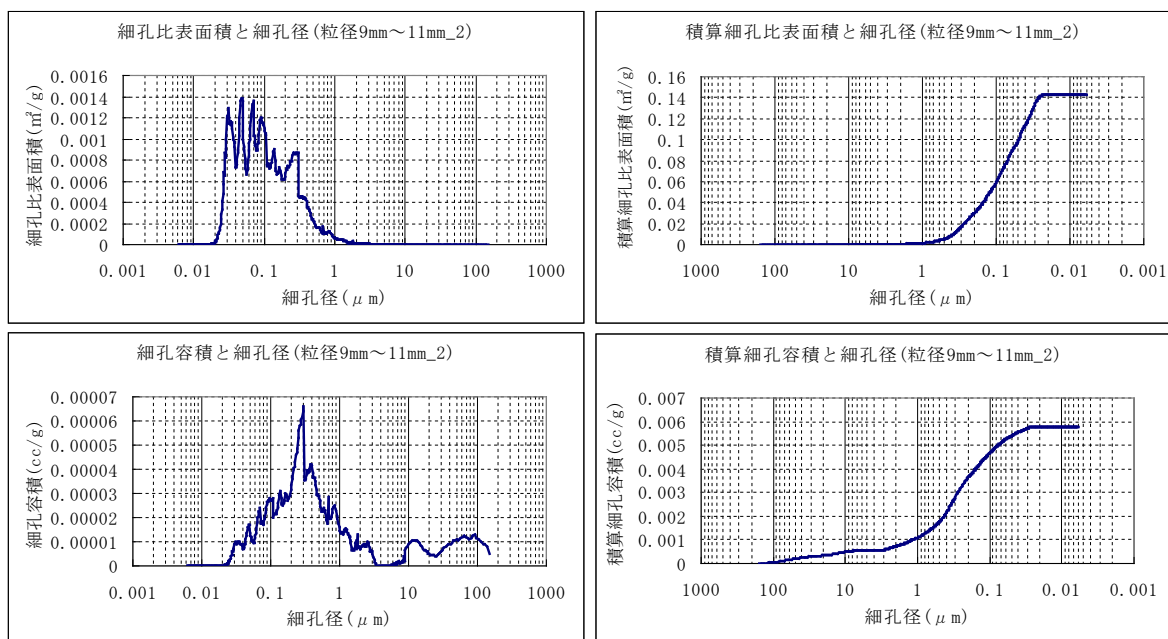


図 3.4-2 間隙径分布 (試料 2)

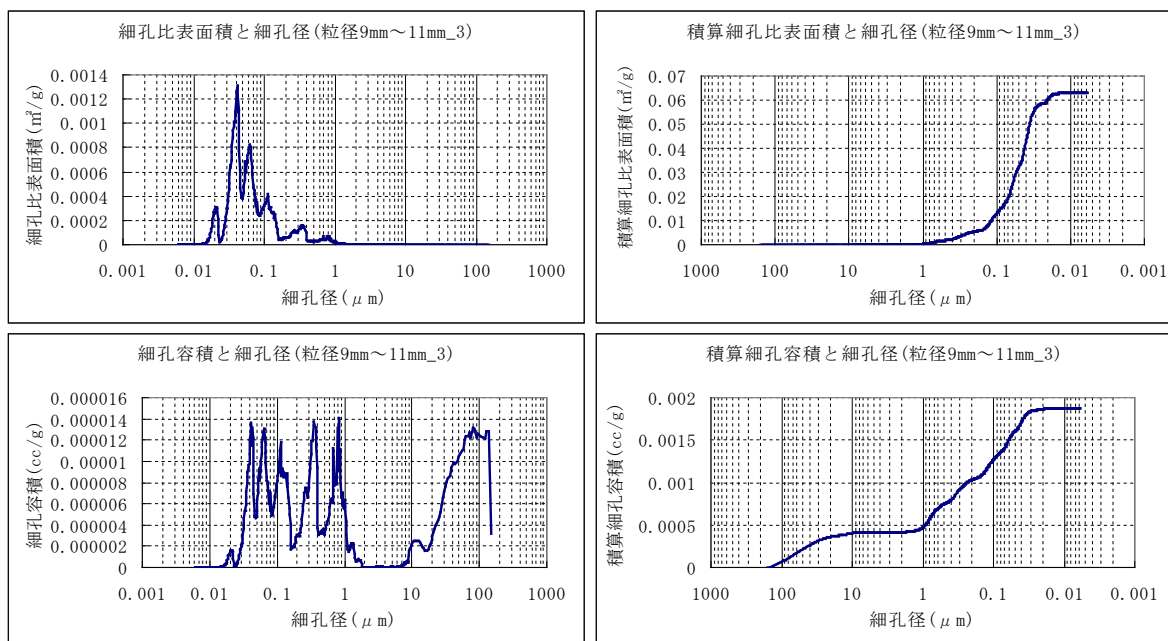


図 3. 4-3 間隙径分布 (試料 3)

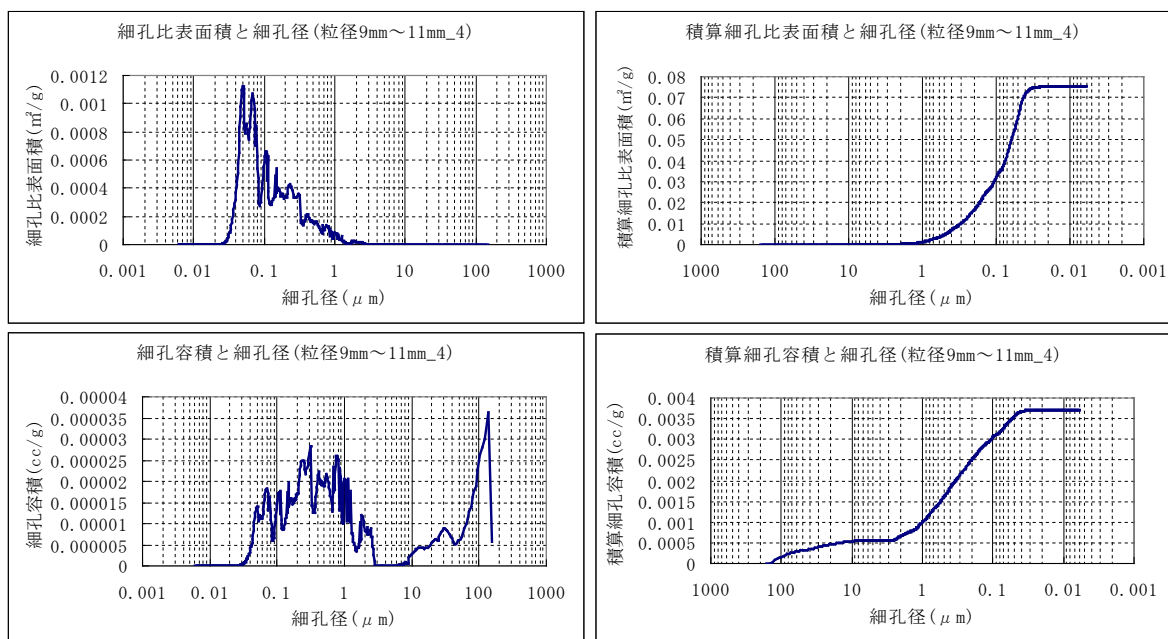


図 3. 4-4 間隙径分布 (試料 4)

3.5 ラドンの発生量試験

3.5.1 試験方法

粒径の異なる花崗岩砕石試料を用いてラドンの溶解水を作成し、シンチレータ抽出法によりラドンフラックスを計測した。試験の手順は以下の通りである。

4 個のエアタイト容器に五徳を設置し、その上にアミを敷きメッシュ袋に入れた粒形の岩石試料をセットした。なお、各容器に入れる分析岩石は表 3.1-1 に示した砕石である。容器に入れた砕石の重量は何れも 2kg である。エアタイト容器には試料が完全に浸るまで蒸留水で満たした後、真空ポンプにより脱気した。また、脱気に固体放射線センサとして ADC フィルムをセットした。容器密閉後は、スターラーを入れ、スターラーを回転させることによって容器内の水を対流させた。

容器内のラドンが放射平衡に達する 1 ヶ月後に各エアタイト容器を開封し、1L のラドン溶解水を回収した。そして、シンチレータがドープされたトルエン 20cc と溶解水を攪拌し、トルエンにラドンを吸着させ、トルエンを回収し、試験体とした。なお、試験点数を増やすためにさらに粒径 1-3mm の試料および 1mm 以下の試料も追加実施した。以下のこの結果を合わせた 6 試料の試験結果を示す。

3.5.2 試験結果

試験結果における粒径に対するラドンフラックスの考え方は以下の通りである。ラドンが岩石の表面近くで発生すると考えると、ラドン発生量は表面積に比例し、ラドンフラックス（単位表面積あたりのラドン発生量）は一定となる。このため、粒径別のラドン発生試験では、ラドンフラックスは粒径に依らず一定になると予測された（図 3.5.2-1）

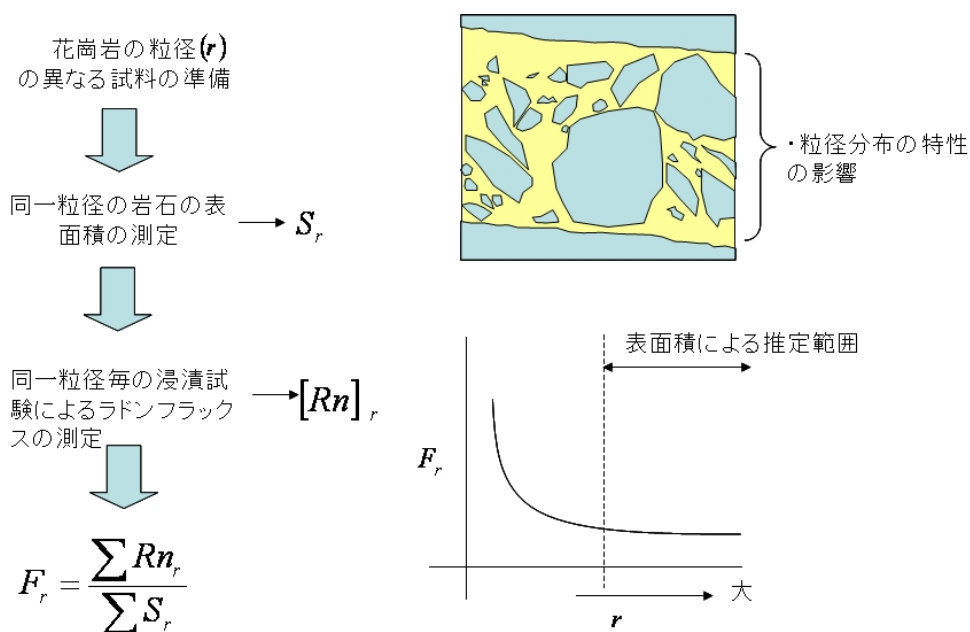


図 3.5.2-1 表面積とラドンフラックスの関係（想定）

得られたラドン濃度は、シンチレータ法で概ね 1 Bq/L をやや越えるような値である。一方、 α トラック方ならびに活性炭吸着法では濃度が低すぎるため、優位な結果が得られていない。このため液体シンチレータ法の結果を用いてラドンフラックスを計測した。

図 3. 5. 2-2 に試験結果から得られた粒径とラドンフラックスの結果を示す。この結果によれば粒径が小さくなるほどラドンフラックスが減少する傾向が認められる。一方、碎石の半径が 0. 4mm 以上で $1.07 \times 10^{-2} \text{Bq/cm}^2$ でラドンフラックスの増加が頭打ちとなっているように見える。この結果は予測に反している。

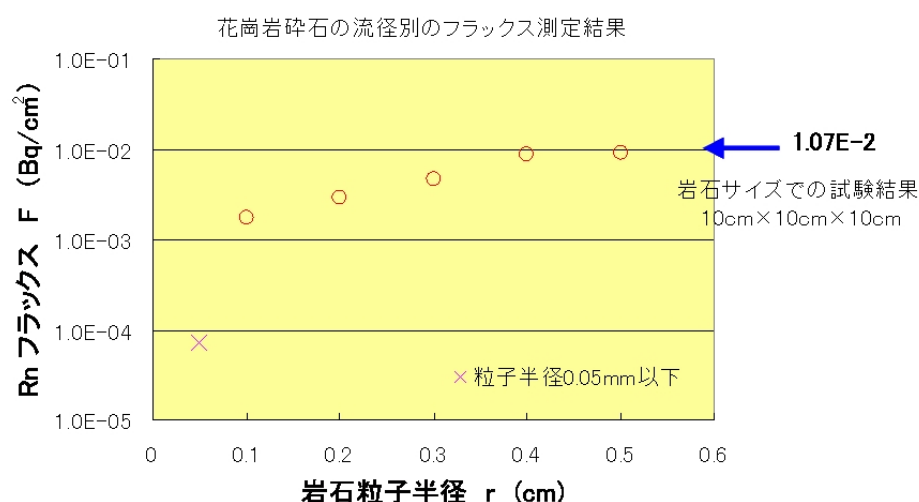


図 3. 5. 2-2 粒径とラドンフラックスの関係

この理由を以下のように解釈すると説明が可能である。図 3. 5. 2-2 の結果は半径 4mm より小さい細礫ではラドンフラックスの大きさに影響することを示している。すなわち、割れ目の介在物が一定の粒径以下となると、その細粒物質から発生するラドンフラックスが減少し、表面積の大きさとラドンの発生量が一定でないことを表している。したがって、ラドンの間隙幅推定モデルに対して、実際の割れ目における介在物の存在による表面積の増加が、割れ目内のラドン濃度の増加に結びつかない可能性がある (図 3. 5. 2-3)。一方で、割れ目介在物の影響を考える上で、さらにはラドンによる割れ目間隙幅推定におけるモデルと実際の割れ目との整合性を考える上では、より発生濃度の高いラドンを用いてフラックスの精度を高める必要がある。その上で以下を課題として検討する必要がある。

① ラドンの発生深度 (発生箇所～岩石表面までの距離) を推定し、粒径との関係を明らかにする。

② 割れ目に介在物が存在する場合のラドン発生モデルの修正

また、これらの課題の解決を通して、レジン注入試験結果に基づいた間隙分布特性と推定された間隙幅の整合性の検討が必要とされる。

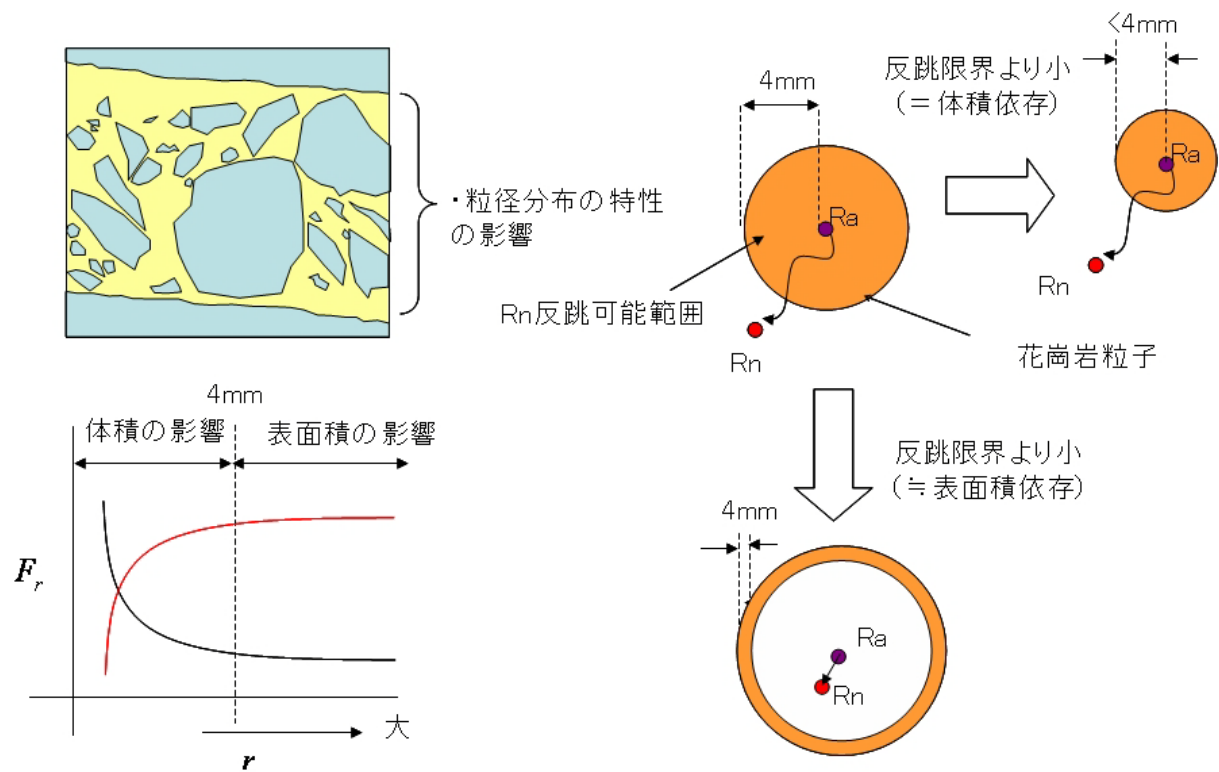


図 3.5.2-3 表面積とラドンフラックスの関係 (結果に基づいた推定)

参考文献

湯口 貴史, 鶴田 忠彦, 西山 忠男 (2010) : 中部日本土岐花崗岩体の岩相と化学組成の累帯変化, 岩石鉱物科学, Vol. 39 , No. 2 March pp. 50-70

4. 高粘性流体の注入による割れ目調査技術の開発

4.1 研究背景

放射性廃棄物の安全評価では、処分した廃棄体から漏出した核種が生物圏へと地下水によって移行する地下水移行シナリオの評価が重要であるとされている。このシナリオでは、地盤内において核種が地下水によって移行されることが想定されている。この核種の移行を評価するためには、地下水の実流速を評価する必要がある。一般的にダルシー流速は、透水係数と動水勾配をかけて算出される断面平均流速を求めており、実流速とは異なる。実流速は、ダルシー流速を有効間隙率で割ったものであり、地下水が実際に流動している速度を示す。有効間隙率は、乾燥法などによって算出される間隙率よりも小さくなることが知られており、実際にトレーサなどを流して評価する必要がある。しかしながら、原位置でのトレーサ試験は、トレーサを流し、その到達を確認する必要があるため、透水試験などに比べて多大な労力と時間を要する。これは、投入側と回収側の区間設置、トレーサの注入と回収、トレーサの分析などが必要なためである。また、トレーサ試験では、孔間距離が長い場合、トレーサの到達に長い時間を要するだけでなく、トレーサが観測孔に到達しない可能性もある。さらに、トレーサ試験では、トレーサの到達に基づいて割れ目の特性を評価するが、一般的にはその評価は原位置での既存の調査に基づいて、流れの次元を仮定し評価される。ただし、流れの次元が異なる場合は、求められるパラメーターが大きく変化する場合もある。例えば、図 4.1-1 に示すように、流れの次元が 1 次元と 2 次元の場合を考える。この場合、地下水が一次的に流れる場合には、地下水の流量と流速は比例するが、二次元的に流れる場合には流速は注入孔からの距離にともなって低下する。このため、到達時間が同じでも流れの次元が異なる場合には、間隙率や割れ目の幅の評価が大きく変化する事となる。また、この研究で目的としている吸着性トレーサの評価においては、流れの次元によってトレーサと割れ目との接触面積が大きく変化する。図 4.1-1 から分かるように、一次的な流動の場合と二次元的な流動の場合では、吸着に寄与する面積が大きく異なる。このため、流れの次元によって吸着特性の結果の解釈は大きく変化する。

これらのことから、地下水の流れの次元や流れに寄与する有効間隙率の評価が核種移行に与える影響を評価することが重要である。ここでは、これらを単孔で評価できる方法について提案し検討を行う。

4.2 研究目的および実施概要

4.2.1 試験原理の概要

提案する方法では、高粘性の流体を地盤に注入し、その際の圧力と流量から、有効間隙率、流れの次元を評価することを目的としている(長谷川ほか、2007)。例えば、図 4.2-1 に示すように、高粘性流体を地盤に定流量で注入した場合を考える。一次元的な流動であれば、流路長が時間とともに線形に増加するため、注入圧力も線形に増加する。一方、軸対称的な流動であれば、高粘性流体が円形に広がるため、注入圧力の増加率は時間に伴って低下する。このように注入圧力の変化から流れの次元が評価できる。さらに、割れ目幅や有効間隙率の大小により、同じ流量の注入でも高粘性流体の到達距離が異なるため、流動抵抗の増加率が異なる。この関係から、割れ目幅や有効間隙率が評価できると考えられる。

ここで、提案する試験では、水よりも粘性の非常に高い流体を注入することにより、高粘性流体の流動による損失水頭が非常に大きく、水による損失水頭を無視して評価できると仮定している。例えば、粘性が水の 60 倍の高粘性流体を注入すると、高粘性流体と水の粘性の比は、水と空気の粘性の比と同じになる。一般的に水の挙動を評価する際に空気の挙動は水に比べて非常に早いとして考慮されない。このため、粘性が水の 60 倍以上の高粘性流体を利用すれば、水による流れが高粘性流体に与える影響は小さいと考え、高粘性流体の挙動だけに基づいて評価が可能と考えている。

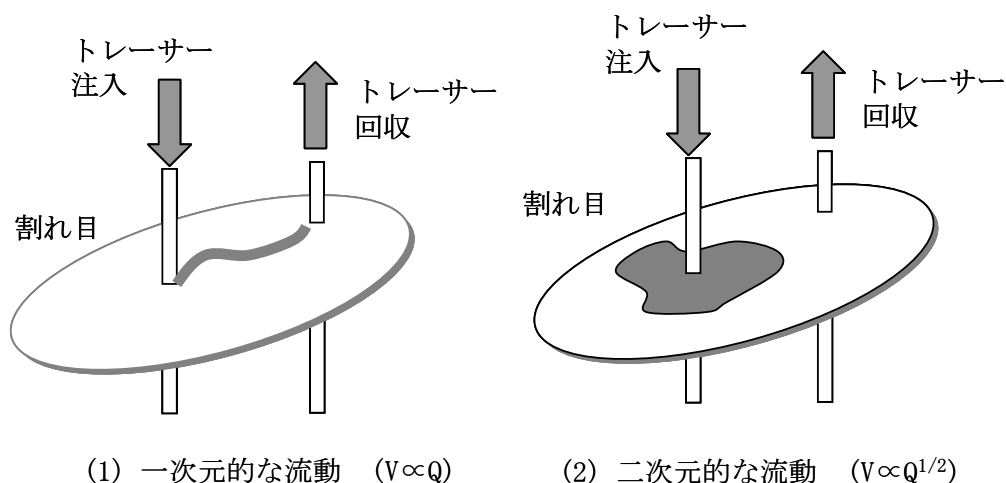


図 4.1-1 流れの次元とトレーサの広がりの概念図

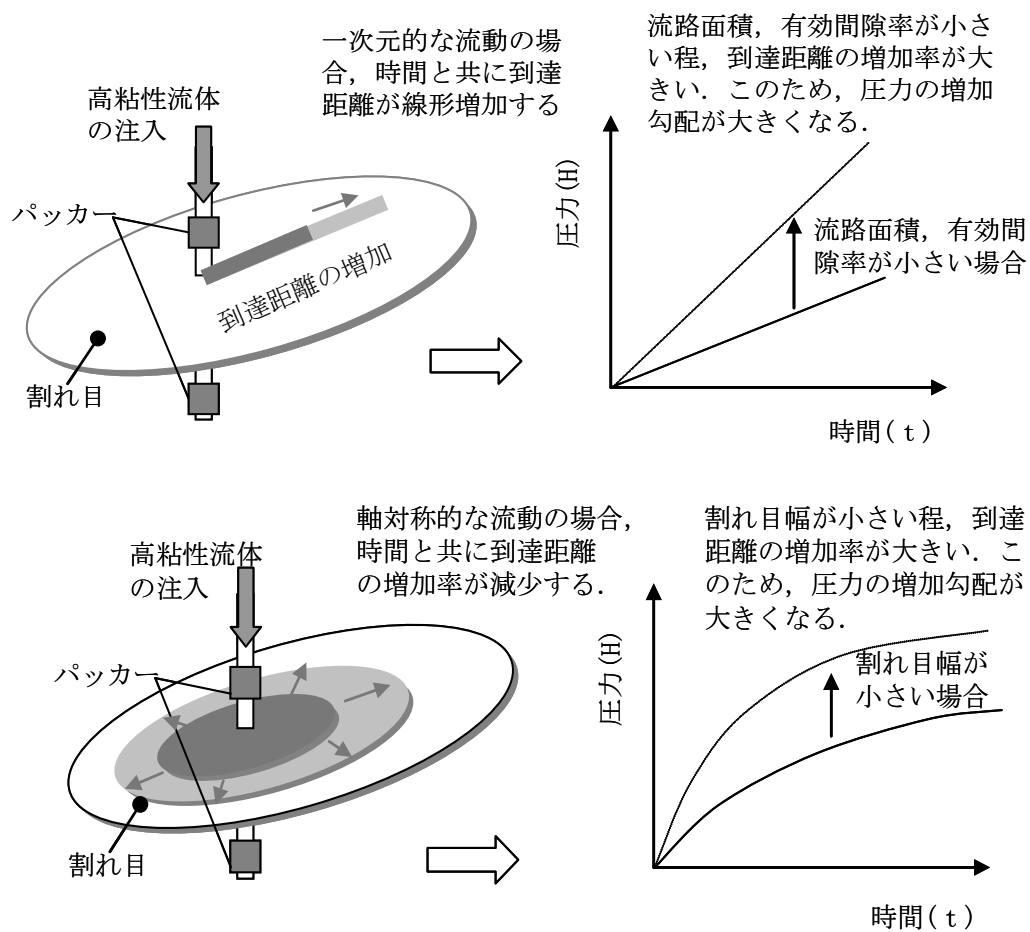


図 4. 2-1 高粘性流体試験の概念図

4.2.2 昨年度までの成果と課題

昨年度までの調査から、以下の成果が得られた。

- ・ 高粘性流体の注入によって、流れの次元や割れ目の幅が評価できることを理論的に示した。
- ・ 高粘性流体は、水にメチルセルロースなどの高分子の溶質を溶解することにより、比較的簡単に作成でき、セルロース系の増粘剤には多数の製品がある。
- ・ 高分子の種類や溶解量を変えることにより、水の 10～1000 倍の粘性を持つ流体を作成できる。また、セルロース系の増粘剤で製作した高粘性流体は、比較的広い粘性の範囲(10cp～1000cp)でニュートン流体として挙動することが、回転粘度計やチューブを用いた粘性計測から確認された。
- ・ 高粘性流体の濾過試験結果から、増粘剤の種類によって溶液に形成されるクラスターの大きさが異なり、目詰まりを起こす可能性がある。60SH-50、65SH-50、65SH-400 などの増粘剤では、粘性にかかわらず $20\mu\text{m}$ のフィルターを通過することから、これらを用いて試験を実施すれば、透水量係数が $1\times 10^{-8}\text{m}^2/\text{s}$ 以上(水理割れ目幅 $20\mu\text{m}$ 程度)の割れ目で試験が可能である。
- ・ 高粘性流体の粘性は温度の増加によって大きく低下するため、温度による粘性の変化を考慮して評価する必要がある。原位置試験を実施する地下では温度の変化は小さいと考えられるため、原位置での温度を考慮して評価する必要がある。
- ・ 鋼管による試験では、一次元の流れを反映し、定流量注入の場合、一次的に圧力上昇が発生することが確認できた。ただし、管内が乾燥した状態と水で飽和した状態とでは圧力の増加傾向が異なり、飽和した状態では乾燥した状態に比べて 20～30%程度管径を過大評価する可能性があることが示唆された。
- ・ 軸対称モデルによる試験では、二次元の流れを反映し、定流量注入の場合、対数関数的に圧力上昇が発生することが確認できた。割れ目面内が乾燥した場合と水で飽和した場合について大きな違いはないものの、注入孔から離れるにともなって流動抵抗が小さくなる結果が得られた。これは割れ目幅の制御が十分にできていないためと推測された。
- ・ 原位置試験装置として、孔内部、圧力計測部、定流量ポンプなどを試作した。孔内部は、高粘性流体を注入する部分のデッドボリュームを小さくするために、パッカー中央部から高粘性流体を注入できる装置を試作した。本装置では、注入区間をプレートなどにより任意に調整することができる。圧力計測部は、高粘性流体注入時の圧力変化を精度良く計測できるように水晶発振型のものを試作した。定流量ポンプは、高粘性流体を 2～100 ml/min の範囲において最大 1.7 MPa で圧送できるモノポンプを試作した。
- ・ Grimsel Test Site において開発した装置を用いて原位置試験を実施した。高粘性流体を定流量で注入した結果、注入孔での圧力上昇から透水量係数、割れ目幅などを評価することができた。高粘性流体の注入実験を実施した BK サイトの 14 m 深度の割れ目は、注入圧力が二段階で変化する

ることから、注入孔周辺に高透水場、孔から離れると低透水場になるという透水係数場が推定された。BK サイトの 25m 深度の割れ目では、注入孔から離れるに伴い透水係数が低下する場であることが確認できた。両者の結果とも、観測孔での圧力応答から高粘性流体の到達が確認でき、高粘性流体の広がり有効な指標になることが明らかになった。

また、課題としては以下が上げられる。

- ・ 軸対称モデルにおける再現性の検討、軸対称モデルは理論解に対して再現性のある結果が得られていないため、確認のために再度試験を実施する必要がある。
- ・ 軸対称モデルによる原位置試験結果の再現性の検討、Grimsel での原位置試験において二段階の透水係数場が存在すると想定されているため、同様な二段階の透水係数場を想定し原位置試験と同様な圧力応答が得られるかを検討する。
- ・ 原位置試験の透水係数場の検討、昨年度、BK サイトの 14m 深度の割れ目では、二段階の透水係数場となっていること、25m 深度の割れ目では注入孔から離れるに伴い透水係数が低下する場であることを、前述の室内試験や解析によって確認する必要がある。

4.2.3 今年度実施計画

昨年度までの成果と課題を鑑みて今年度は以下の項目を実施する。

1) 室内試験による高粘性流体の理論の検討

高粘性流体を注入して流れの次元や割れ目の幅などが適切に評価できること、およびその再現性と解像度を確認するために、鋼管および割れ目モデルを用いた高粘性流体の注入試験を実施する。

① 鋼管による流動試験

鋼管に一定流量で高粘性流体を注入し、高粘性流体の注入圧力から、流れの次元や管径などが適切に評価できるかどうかを調査する。特に、鋼管の径が変化する場合を対象に試験を実施し、高粘性流体試験による現象の再現性を検討する。

② 割れ目モデルによる流動試験

軸対称割れ目モデルに、一定流量で高粘性流体を注入し、高粘性流体の注入圧力を観測する。これにより、流れの次元や割れ目幅などが適切に評価できるかどうかを調査する。

2) 高粘性流体注入の解析による圧力応答の検討

原位置試験における注入孔および観測孔での圧力応答について評価するために、不均質な場を仮定した高粘性流体の注入解析を実施し、圧力応答に与える影響について調査する。

3) 原位置でのモデルの検討

今年度の室内試験結果および解析結果に基づいて 14m 地点および 25m 地点での割れ目モデルを検討する。

4.3 室内高粘性流体注入試験

高粘性流体試験では、岩盤に高粘性流体を注入し、その際の圧力と流量の関係から、流れの次元と有効間隙率あるいは割れ目幅を求めることを目的としている。このためには、高粘性流体が粘性流体として理論通りに流動する必要がある。特に原位置の岩盤に高粘性流体を注入する場合には、①高粘性流体と地下水との混合による希釈、②高粘性流体と岩盤の間に水が残留することによる滑り、などの影響で適切に流れの次元、有効間隙率あるいは割れ目幅を評価できない可能性がある。このため、室内において原位置の状況を模擬した高粘性流体の注入試験を実施し、どの程度の精度で流れの次元や間隙率が評価できるかを確認しておく必要がある。

これまでに、一次元割れ目モデルや軸対称割れ目モデルを用いて試験を実施してきたが、ポンプの定流量性、模型の割れ目幅の制御、高粘性流体の圧縮性などの影響で評価結果にバラツキが多かった。これらの課題は、モノポンプや圧縮性の少ない鋼管などを利用することにより、改善されてきたが、軸対称モデルについては理論との整合性が不十分であった。昨年度作成した円形のモデルにより、注入孔周辺での圧力上昇（注入初期）は再現できるようになったが、全円に対して割れ目幅が制御出来ているとは考えにくい結果であった。このため、今年度は軸対称モデルを再度試作することにより、実験結果の再現性について検討した。また、高粘性流体試験の有効性を確認するために、鋼管試験では鋼管の径が変化する場合の試験を実施し、軸対称モデルでは割れ目幅が変化する場合の試験を実施した。

4.3.1 鋼管を用いた高粘性流体試験

(1) 試験条件

昨年度に引き続き、高粘性流体注入により一次元流動時の評価が適切にできるかどうかを確認するために試験を実施する。ここでは、変形が少ないと考えられる鋼管を用いて高粘性流体試験を実施し、流れの次元や鋼管の管径が適切に評価できるかどうかを検討した。特に、高粘性流体試験では、水が存在する場合、流速が異なる場合にどのような影響があるのかを明確にしておく必要がある。このため、管内への水の有無、流速などを変えて試験を実施した。また、管内が水で飽和された場合、鋼管の管径を過大評価する傾向、すなわち、流れやすくなる傾向があった。この原因が①高粘性流体と地下水との混合による希釈、②高粘性流体と岩盤の間に水が残留することによる滑りであるかを明らかにするために、昨年度から流出側での濃度計測を実施している。

(2) 一次元の理論式

一次元の鋼管において、高粘性流体を定流量注入した際の理論式について整理する。まず、運動の式として以下の式が与えられる。

$$v = \frac{k}{\mu} i \quad (4.3.1-1)$$

ここに、 k は割れ目の透水係数、 μ は粘性係数、 i は動水勾配である。

ダルシー則と比べて、粘性に反比例して流れにくくなるため、上式のように表現される。

定流量注入試験では、注入時間に伴って浸潤前線が進む。このため、連続の式として以下が与えられる。

$$Qt = Al \quad (4.3.1-2)$$

ここに、 Q は定流量注入量、 t は注入時間、 A は高粘性流体を注入する断面積、 l は浸潤前線の位置である。

流量(Q)と注入圧力(h)の関係は、式(4.3.1-1)に断面積(A)をかけることにより、次式で与えられる。

$$Q = \frac{k}{\mu} i A = \frac{k}{\mu} \frac{h}{l} A \quad (4.3.1-3)$$

ここに、流量(Q)は vA 、動水勾配(i)は h/l である。

また、定流量注入では、連続の式から、到達距離 l は次式で表される。

$$l = \frac{Qt}{A} \quad (4.3.1-4)$$

このため、 h の時間変化は式(4.3.1-3)と式(4.3.1-4)から以下のように与えられる。

$$h = \frac{\mu Q^2 t}{k A^2} \quad (4.3.1-5)$$

さらに、 k は h の時間変化から次のように与えられる。

$$k = \frac{\mu Q^2}{a A^2} \quad (4.3.1-6)$$

ここに、 a は圧力勾配($=dh/dt$)である。

ただし、試験結果では、流量(Q)、粘性(μ)、圧力勾配(a)は既知であるが、 k と A については未知である。このため、透水試験結果あるいは高粘性流体試験結果の定常時の結果を用いて式(4.3.1-3)に基づいて、 kA を求める。

$$kA = \frac{\mu Q L}{H} \quad (4.3.1-7)$$

ここに、 Q は定常時の流量、 H は定常時の圧力、 L は鋼管の長さである。

鋼管の断面積は式(4.3.1-6)に基づいて、次式で与えられる。

$$A = \frac{\mu Q^2}{a[kA]} \quad (4.3.1-8)$$

ここに[kA]は式(4.3.1-7)で得られたものを示す。

ただし、式(4.3.1-8)に式(4.3.1-7)を代入すると次式が得られる。

$$A = \frac{H}{aL} = \frac{QT}{L} \quad (4.3.1-9)$$

ここに、 a は dh/dt であるため、一次元では傾きが一定のため H/T とも表すことができ、最終的には式(4.3.1-2)に戻ってしまう。

このため、1次元の場合には、 L が分からなければ A が決定できない。このため原位置試験では注入孔以外の観測孔で圧力を調査し、圧力の到達を評価する必要がある。

試験においては、 L が分かっているため、1次元流動試験結果は、式(4.3.1-7)と式(4.3.1-8)に基づいて整理することとする。

(3) 試験方法および試験ケース

試験の概念図を図4.3.1-1に示す。試験では、径が一定の鋼管に対する高粘性流体の注入試験と管径を変えた場合の試験を実施した。表4.3.1-1に示した鋼管を用いて高粘性流体を定流量で注入し、注入圧力の経時変化から鋼管の内径を評価した。また、高粘性流体作成時に塩分を添加することにより高粘性流体の電気伝導度を高め、流出側において電気伝導度計で計測することにより高粘性流体の希釈を評価した。

試験においては、管径および管径の組み合わせ、流量をパラメーターとした。なお、試験は同条件(流量、粘性、管内が飽和/乾燥)で試験を3度繰り返して再現性を確認した。

(4) 管径が一定の場合の試験結果

代表的な試験結果を図 4.3.1-2 に示す。図には、定流量で高粘性流体を注入した場合の注入圧力と時間の関係、鋼管から流出する流体の電気伝導度と時間の関係を示している。電気伝導度は、流出端から出てきた流体の電気伝導度を直接計測するのではなく、15cc 程度たまと計測が可能になるため、時間差が発生している。試験は、同一流量、同一粘性で、管内が乾燥と飽和の場合を 3 度ずつ実施した結果を示している。

実験結果から、関係は次の 3 つの方法で求めた。

- 1) 試験終了時圧力(定常状態圧力)から透水係数を求め、透水係数から次式で管径を求める(式(4.3.1-7)参照)。
- 2) 非定常状態の圧力増加率から管径を求める(式(4.3.1-8)参照)。
- 3) 到達時間と総注入量の関係から以下の式で管径を求める。

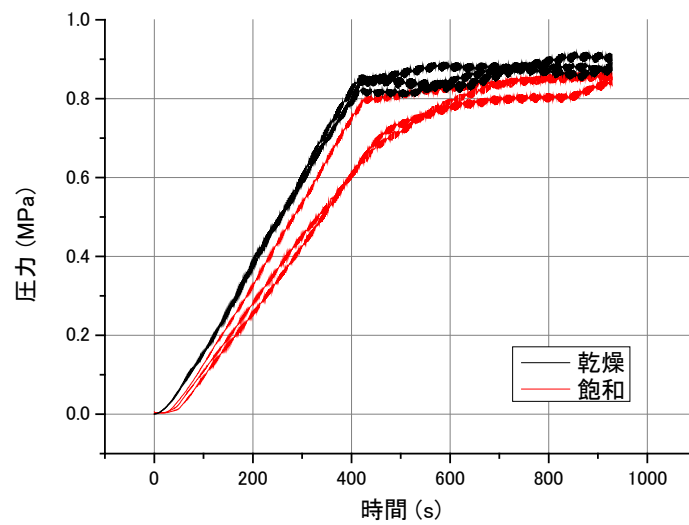
$$D = \sqrt{\frac{4Qt}{\pi L}} \quad (Qt = \frac{\pi D^2 L}{4}) \quad (4.3.1-10)$$

ここに、D は管径、Q は注入流量、t は高粘性流体の注入を開始してから管端から出始めるまでの時間、L は管の長さである。

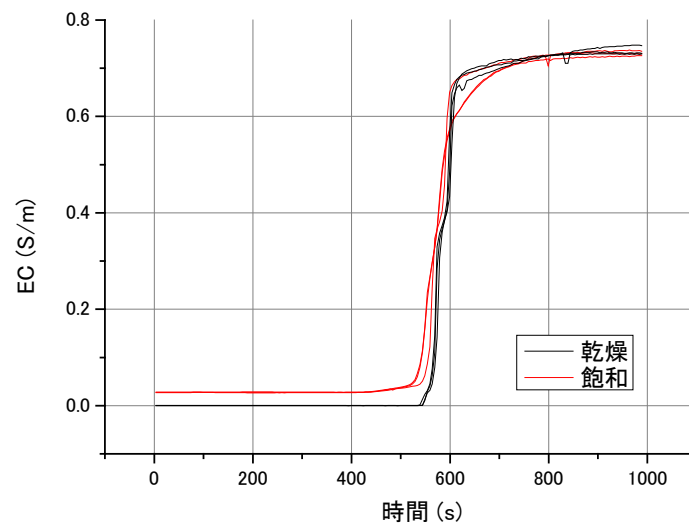
上記の方法で管径を求めたものを表 4.3.1-2 に示す。これらの結果を各管に対して流量への依存性としてまとめなおしたものを図 4.3.1-3～5 に示す。

管内が水で満たされたものでは、飽和の場合に比べて管径がやや大きくなりバラツキが大きいことがわかる。このため、管内に水がある場合には、その影響がでている可能性がある。ただし、その影響は 5%程度であり、昨年度より小さくなっている。昨年度よりも実験時の粘性が大きいことが一因ではないかと考えられる。また、流量の変化による影響は小さいと考えられる。

管径について上記の各方法によって評価したものを整理しなおしたものを表 4.3.1-3 に示す。管径の評価結果から、いずれの方法においてもほぼ同程度の管径が算出されており、高粘性流体の注入によって管径が適切に評価できていると考えられる。また、試験でのバラツキも小さいため、一次元的な流動で流動経路が十分に長ければ、水の有無にかかわらず、一次元的な流動を適切に評価できると考えられた。



(1) 注入圧力の経時変化



(2) 電気伝導度の経時変化

図 4.3.1-2 1/8inch 鋼管に高粘性流体を注入した場合の試験結果
(粘性 262 cp、流量 5 cc/min、長さ 12m)

表 4. 3. 1-2 管径が一定の条件での鋼管試験結果

管	長さ	流量	粘性	条件	定常圧力	圧力勾配			傾き	管径		
	L	Q	μ			一定時間	開始	終了	a	定常圧力から	到達時間から	圧力勾配から
	m	cc/min	cp		Mpa	s	s	s	Mpa/s	mm	mm	mm
1/8	12	2.1	262.3	飽和1	3.85E-01	892	108	1000	0.00042	1.854	1.814	1.852
1/8	12	2.1	262.3	飽和2	3.27E-01	910	108	1018	0.00033	1.934	1.838	1.932
1/8	12	2.1	262.3	飽和3	3.25E-01	992	108	1100	0.00033	1.941	1.927	1.936
1/8	12	2.1	262.3	乾燥1	3.56E-01	962	108	1070	0.00038	1.898	1.899	1.888
1/8	12	2.1	262.3	乾燥2	3.65E-01	952	108	1060	0.00038	1.890	1.895	1.892
1/8	12	2.1	262.3	乾燥3	3.61E-01	958	108	1066	0.00038	1.898	1.906	1.894
1/8	12	5.0	261.9	飽和1	8.21E-01	390	90	480	0.00205	1.911	1.862	1.903
1/8	12	5.0	261.9	飽和2	8.35E-01	400	90	490	0.00219	1.896	1.872	1.873
1/8	12	4.9	261.9	飽和3	8.78E-01	400	90	490	0.00212	1.871	1.869	1.881
1/8	12	4.9	261.9	乾燥1	8.27E-01	395	90	485	0.00212	1.899	1.857	1.880
1/8	12	5.0	261.9	乾燥2	7.72E-01	423	90	513	0.00165	1.934	1.927	1.965
1/8	12	5.0	261.9	乾燥3	7.66E-01	440	90	530	0.00169	1.939	1.967	1.957
1/8	12	9.6	316	飽和1	1.62E+00	170	80	250	0.00942	1.984	1.696	1.887
1/8	12	10.0	316	飽和2	1.90E+00	205	80	285	0.00552	1.927	1.902	2.092
1/8	12	10.0	316	飽和3	1.82E+00	186	80	266	0.00879	1.950	1.813	1.937
1/8	12	10.0	316	乾燥1	1.83E+00	170	80	250	0.01077	1.948	1.734	1.873
1/8	12	10.0	316	乾燥2	1.94E+00	170	80	250	0.01084	1.919	1.734	1.871
1/8	12	10.0	316	乾燥3	1.92E+00	170	80	250	0.01082	1.923	1.735	1.872
1/8'	12	1.8	247.6	飽和1	5.72E-01	715	100	815	0.00079	1.592	1.503	1.565
1/8'	12	1.9	247.6	飽和2	6.03E-01	710	100	810	0.00085	1.586	1.525	1.563
1/8'	12	1.9	247.6	飽和3	6.57E-01	700	100	800	0.00095	1.557	1.524	1.542
1/8'	12	1.9	247.6	乾燥1	7.03E-01	710	100	810	0.00104	1.528	1.527	1.515
1/8'	12	1.8	247.6	乾燥2	6.57E-01	715	100	815	0.00101	1.535	1.497	1.499
1/8'	12	1.8	247.6	乾燥3	6.23E-01	710	100	810	0.00094	1.559	1.499	1.521
1/8'	12	4.7	247.6	飽和1	1.38E+00	285	80	365	0.00497	1.624	1.534	1.587
1/8'	12	4.8	247.6	飽和2	1.33E+00	335	80	415	0.00389	1.648	1.681	1.664
1/8'	12	4.7	247.6	飽和3	1.32E+00	330	80	410	0.00395	1.649	1.664	1.658
1/8'	12	4.7	247.6	乾燥1	1.36E+00	285	80	365	0.00488	1.632	1.539	1.595
1/8'	12	4.6	247.6	乾燥2	1.58E+00	295	80	375	0.00551	1.566	1.553	1.555
1/8'	12	4.7	247.6	乾燥3	1.47E+00	300	80	380	0.00533	1.601	1.576	1.570
1/8'	12	9.1	247.6	飽和1	2.66E+00	130	70	200	0.02057	1.630	1.449	1.566
1/8'	12	8.9	247.6	飽和2	2.64E+00	140	70	210	0.01950	1.625	1.487	1.569
1/8'	12	9.0	247.6	飽和3	2.77E+00	157	70	227	0.01818	1.609	1.583	1.593
1/8'	12	9.0	247.6	乾燥1	2.80E+00	130	70	200	0.02144	1.603	1.435	1.546
1/8'	12	9.0	247.6	乾燥2	2.74E+00	130	70	200	0.02203	1.613	1.440	1.542
1/8'	12	9.0	247.6	乾燥3	2.69E+00	130	70	200	0.02167	1.621	1.441	1.547
3/16	12	5.1	272.7	飽和1	1.01E-01	1200	150	1350	0.00008	3.275	3.293	3.294
3/16	12	5.1	272.7	飽和2	9.73E-02	1220	150	1370	0.00008	3.305	3.324	3.288
3/16	12	5.1	272.7	飽和3	9.83E-02	1220	150	1370	0.00008	3.298	3.325	3.299
3/16	12	5.1	272.7	乾燥1	1.06E-01	1220	150	1370	0.00009	3.238	3.324	3.259
3/16	12	5.1	272.7	乾燥2	1.10E-01	1220	150	1370	0.00009	3.206	3.325	3.240
3/16	12	5.1	272.7	乾燥3	1.12E-01	1220	150	1370	0.00009	3.193	3.325	3.241
3/16	12	10.0	272.7	飽和1	2.03E-01	525	60	585	0.00040	3.252	3.047	3.166
3/16	12	10.0	272.7	飽和2	2.03E-01	525	60	585	0.00033	3.251	3.047	3.264
3/16	12	10.0	272.7	飽和3	2.04E-01	525	60	585	0.00035	3.247	3.047	3.227
3/16	12	10.0	272.7	乾燥1	2.31E-01	525	60	585	0.00048	3.149	3.047	3.071
3/16	12	10.0	272.7	乾燥2	2.23E-01	525	60	585	0.00040	3.176	3.047	3.162
3/16	12	10.0	272.7	乾燥3	2.36E-01	525	60	585	0.00047	3.130	3.047	3.076
3/16	12	20.0	316	飽和1	3.86E-01	285	80	365	0.00129	3.414	3.173	3.359
3/16	12	19.8	316	飽和2	3.92E-01	306	80	386	0.00127	3.396	3.277	3.361
3/16	12	19.4	316	飽和3	4.16E-01	306	80	386	0.00137	3.328	3.243	3.297
3/16	12	19.0	316	乾燥1	4.90E-01	258	80	338	0.00174	3.179	2.946	3.144
3/16	12	20.0	316	乾燥2	5.04E-01	252	80	332	0.00194	3.197	2.988	3.141
3/16	12	20.0	316	乾燥3	4.88E-01	251	80	331	0.00186	3.222	2.981	3.163

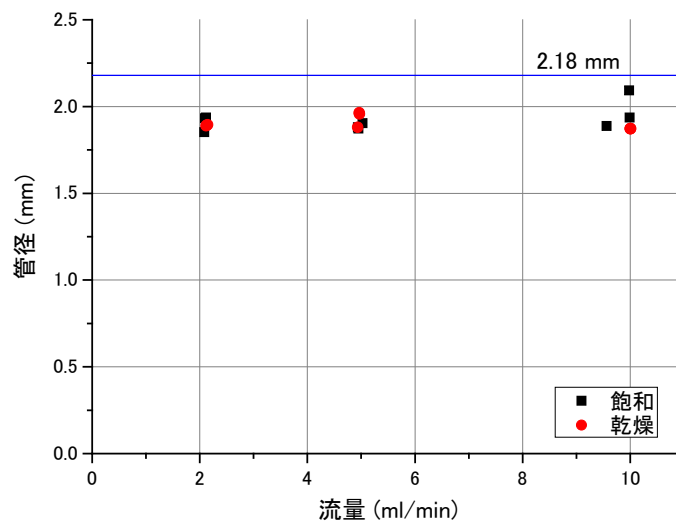


図 4.3.1-3 1/8 inch 鋼管における高粘性流体注入での管径の評価結果

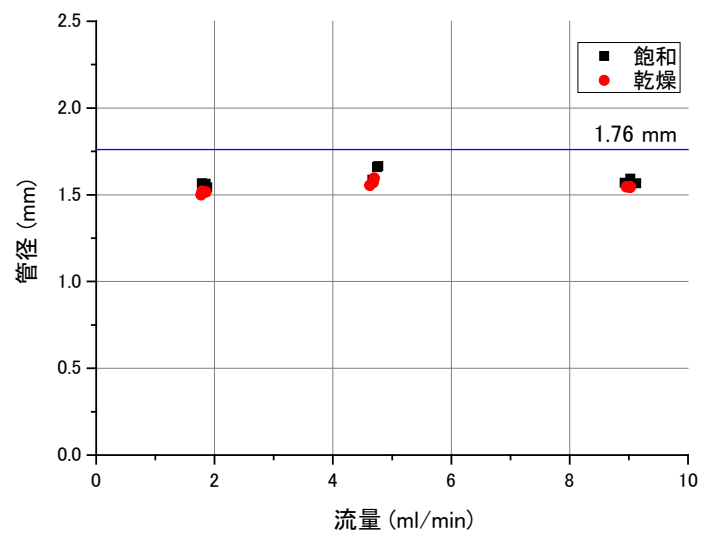


図 4.3.1-4 1/8' inch 鋼管における高粘性流体注入での管径の評価結果

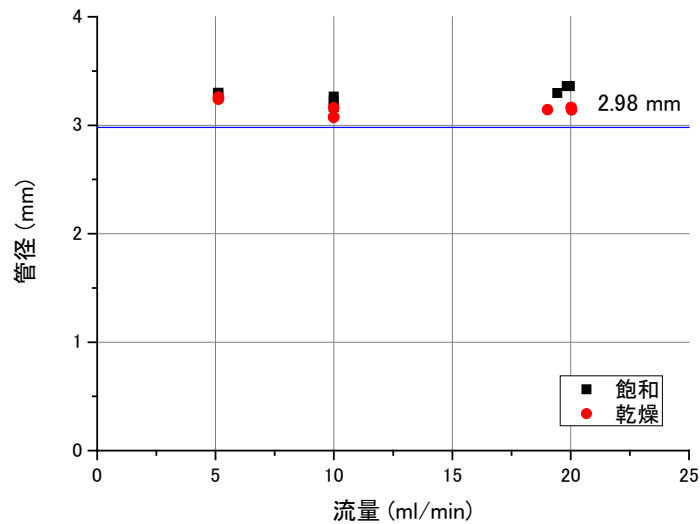


図 4.3.1-5 1/8' inch 鋼管における高粘性流体注入での管径の評価結果

表 4.3.1-3 高粘性流体注入試験による鋼管管径の推定結果

鋼管名称	管径(mm)				管径(mm)	
鋼管名称	設計値	定常圧力から	到達時間から	圧力勾配から	圧力勾配(飽和)	圧力勾配(乾燥)
1/8 inch	2.18	1.92±0.03	1.85±0.08	1.91±0.06	1.92±0.07	1.90±0.04
1/8' inch	1.76	1.60±0.04	1.53±0.07	1.57±0.04	1.59±0.04	1.54±0.03
3/16	2.98	3.25±0.06	3.16±0.08	3.23±0.09	3.28±0.06	3.17±0.07

(5) 管径が変化する場合の試験結果

管径が一定でなく変化する場合についても試験を実施した。管の長さは一本当たり 2m で、これを連結することにより、管径を変化させた。実験結果を図 4.4.1-6～9 に示す。図には、定流量で高粘性流体を注入した場合の注入圧力の時間変化を図化した。試験は、同一流量、同一粘性で、管内が乾燥と飽和の場合の 3 度ずつの計 6 回の実験結果を示している。

この圧力の時間的な変化の内、圧力勾配が一定と見なされる部分で分割し、その時間と圧力勾配から管径を求めた。これらの結果を整理したものを表 4.3.1-4～11 にまとめた。計算方法は前項での計算方法と同じであるが、定常圧力から管径を求めたものは示していない。これは管径が途中で変わっており、定常圧力から管径を求めても比較できないためである。

表 4.3.1-4～5 には 1/8' +1/8+1/8' をつなげた場合の結果を示す。管径が細い→太い→細いという定性的な変化は評価できているものの、管径が太いものは細く、細いものは大きく、管径の違いがぼや

けたような結果となっている。表 4.3.1-6～7 には $3/16+1/8+1/8'$ と徐々に細くなる場合の評価結果を示す。この場合には、管径の低下が概ね再現できている。表 4.3.1-8～9 に $1/8' + 1/8+1/8' + 1/8+1/8' + 1/8$ とした場合の結果を示す。管径が細い→太いと繰り返し変化しており定性的な傾向は示せるものの、 $1/8' + 1/8+1/8'$ の結果と同じく、全体にぼやけたような結果となっている。表 4.3.1-10～11 には $3/16+1/8+1/8' + 3/16+1/8+1/8'$ の結果を示す。概ね適切に評価できているが、中間部の $1/8' \rightarrow 3/16$ において、 $3/16$ の評価結果が過大評価になっている。ここでも、管径が細い→太い場合に誤差が大きくなっており、このような場合に解像度が低下する傾向にある。これは、管径が大きくなる場合には圧力の増加が緩くなり、誤差の影響を受けやすいと考えられる。

上記のように傾向として、管径が太い方から細い方へと変化する場合には解像度があるが、管径が細い方から太い方に変化すると解像度の低下が顕著である。

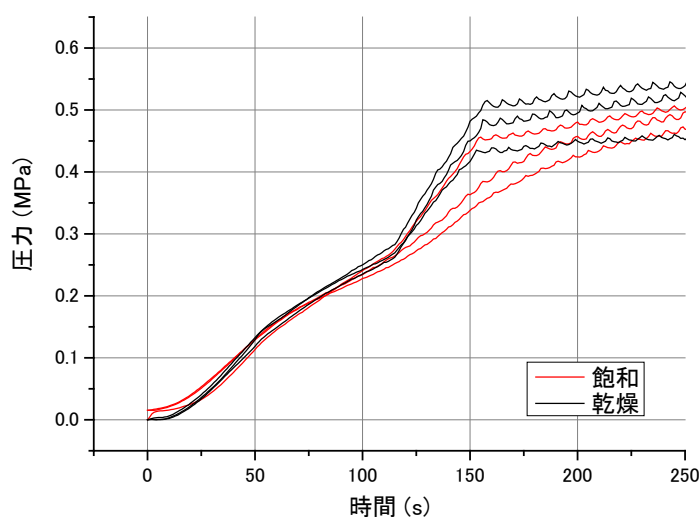


図 4.3.1-6 $1/8' + 1/8+1/8'$ (各 4m) の場合の実験結果

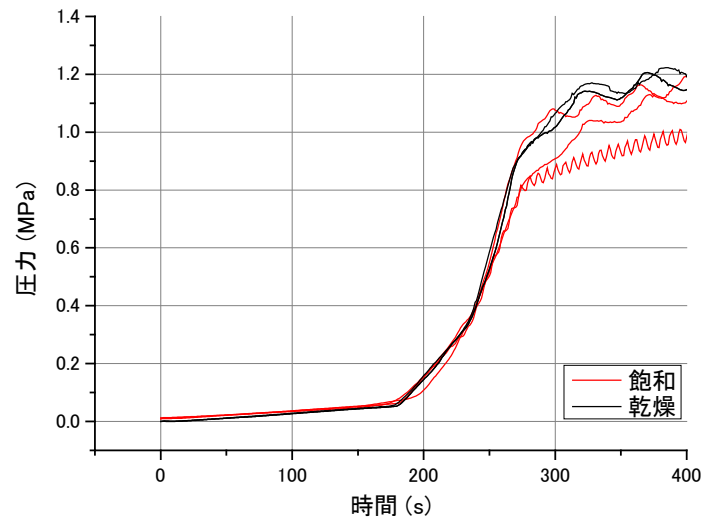


図 4.3.1-7 3/16+1/8+1/8' (各 4m) の場合の実験結果

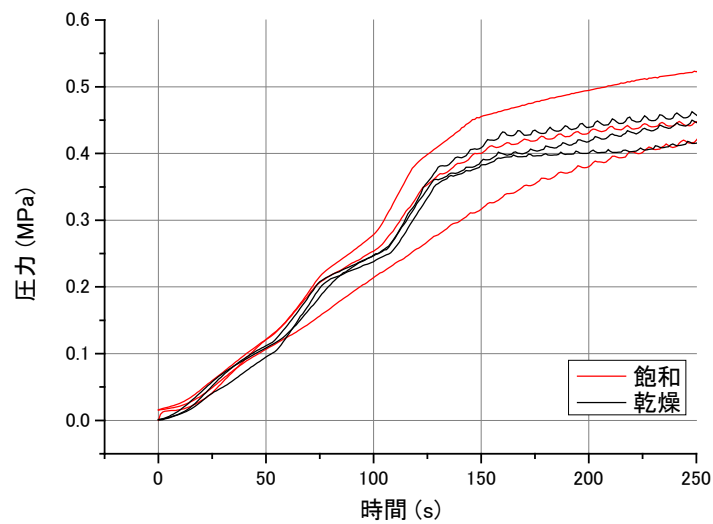


図 4.3.1-8 1/8' + 1/8+1/8' + 1/8+1/8' + 1/8 (各 2m) の場合の実験結果

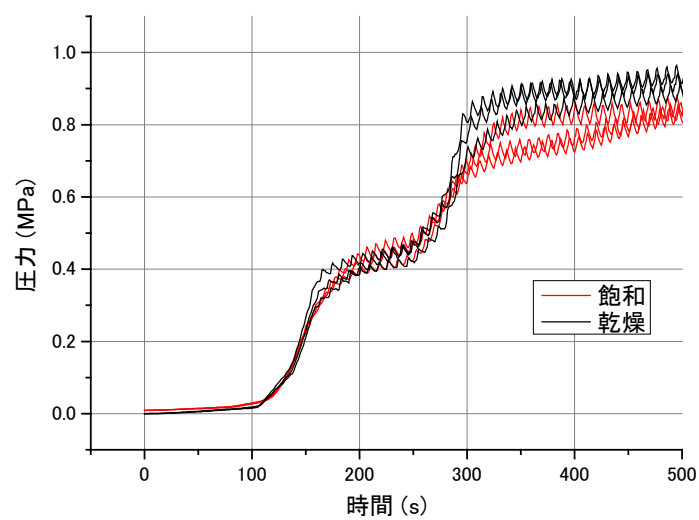


図 4.3.1-9 3/16+1/8+1/8' + 3/16+1/8+1/8' (各 2m) の場合の実験結果

表 4.3.1-4 1/8'+1/8+1/8'(各 4m) の場合の管径の評価結果

管	長さ	流量	粘性	条件	圧力勾配			傾き	管径	
	L	Q	μ		一定時間	開始	終了	a	到達時間から	圧力勾配から
	m	cc/min	cp		s	s	s	Mpa/s	mm	mm
1/8'	4	10	45.4	飽和1	68	70	138	0.00255	1.899	1.723
1/8	4	10	45.4		48	139	187	0.00187	1.596	1.814
1/8'	4	10	45.4		47	187	234	0.00286	1.579	1.690
1/8'	4	10	45.4	飽和2	68	70	138	0.00272	1.899	1.704
1/8	4	10	45.4		50	139	189	0.00160	1.629	1.863
1/8'	4	10	45.4		45	190	235	0.00254	1.545	1.725
1/8'	4	10	45.4	飽和3	45	70	115	0.00317	1.545	1.662
1/8	4	10	45.4		60	116	176	0.00236	1.784	1.746
1/8'	4	10	45.4		41	177	218	0.00446	1.475	1.570
1/8'	4	10	45.4	乾燥1	46	70	116	0.00313	1.562	1.665
1/8	4	10	45.4		58	117	175	0.00205	1.754	1.788
1/8'	4	10	45.4		44	176	220	0.00505	1.528	1.538
1/8'	4	10	45.4	乾燥2	46	70	116	0.00337	1.562	1.645
1/8	4	10	45.4		58	117	175	0.00223	1.754	1.762
1/8'	4	10	45.4		44	176	220	0.00532	1.528	1.525
1/8'	4	10	45.4	乾燥3	46	70	116	0.00336	1.562	1.646
1/8	4	10	45.4		58	117	175	0.00190	1.754	1.809
1/8'	4	10	45.4		37	176	213	0.00432	1.401	1.578

表 4.3.1-5 1/8'+1/8+1/8'(各 4m) の場合の管径の評価結果のまとめ

管径 (inch)	設計値 (mm)	到達時間から		圧力勾配から	
		飽和	乾燥	飽和	乾燥
1/8'	1.76	1.70±0.03	1.65±0.01	1.78±0.20	1.56±0.00
1/8	2.18	1.81±0.06	1.79±0.02	1.67±0.10	1.75±0.00
1/8'	1.76	1.66±0.08	1.55±0.03	1.53±0.05	1.49±0.07

表 4.3.1-6 3/16+1/8+1/8' (各 4m) の場合の管径の評価結果

管	長さ	流量	粘性	条件	圧力勾配			傾き	管径	
	L	Q	μ		一定時間	開始	終了	a	到達時間から	圧力勾配から
	m	cc/min	cp		s	s	s	Mpa/s	mm	mm
3/16	4	9.0	161.9	飽和1	220	70	290	0.00024	3.242	3.049
1/8	4	9.0	161.9		58	291	349	0.00475	1.665	1.854
1/8'	4	9.0	161.9		40	350	390	0.01167	1.383	1.596
3/16	4	10.5	161.9	飽和2	177	70	247	0.00032	3.141	3.058
1/8	4	10.5	161.9		52	248	300	0.00587	1.702	1.884
1/8'	4	10.5	161.9		36	300	336	0.01688	1.417	1.580
3/16	4	10.7	161.9	飽和3	208	70	278	0.00034	3.431	3.051
1/8	4	10.7	161.9		34	279	313	0.00658	1.387	1.858
1/8'	4	10.7	161.9		46	314	360	0.01150	1.613	1.693
3/16	4	10.6	161.9	乾燥1	175	70	245	0.00032	3.133	3.059
1/8	4	10.6	161.9		54	246	300	0.00562	1.740	1.902
1/8'	4	10.6	161.9		32	300	332	0.01645	1.340	1.590
3/16	4	10.6	161.9	乾燥2	173	70	243	0.00032	3.115	3.066
1/8	4	10.6	161.9		54	244	298	0.00549	1.740	1.909
1/8'	4	10.6	161.9		34	299	333	0.01619	1.381	1.594
3/16	4	10.6	161.9	乾燥3	170	70	240	0.00033	3.089	3.056
1/8	4	10.6	161.9		59	241	300	0.00541	1.820	1.914
1/8'	4	10.6	161.9		31	300	331	0.01625	1.319	1.594

表 4.3.1-7 3/16+1/8+1/8' (各 4m) の場合の管径の評価結果のまとめ

管径 (inch)	設計値 (mm)	到達時間から		圧力勾配から	
		飽和	乾燥	飽和	乾燥
3/16	2.98	3.27±0.15	3.11±0.02	3.05±0.00	3.06±0.01
1/8	2.18	1.58±0.17	1.77±0.05	1.87±0.02	1.91±0.01
1/8'	1.76	1.47±0.12	1.35±0.03	1.62±0.06	1.59±0.00

表 4.3.1-8 1/8'+1/8+1/8' +1/8+1/8' +1/8(各 2m) の場合の管径の評価結果

管	長さ	流量	粘性	条件	圧力勾配			傾き	管径	
	L	Q	μ		一定時間	開始	終了	a	到達時間から	圧力勾配から
	m	cc/min	cp		s	s	s	Mpa/s	mm	mm
1/8'	2	10	45.4	飽和1	30	70	100	0.00250	1.784	1.729
1/8	2	10	45.4		20	101	121	0.00297	1.457	1.680
1/8'	2	10	45.4		15	122	137	0.00438	1.262	1.575
1/8	2	10	45.4		27	138	165	0.00254	1.693	1.725
1/8'	2	10	45.4		15	166	181	0.00578	1.262	1.504
1/8	2	10	45.4	飽和2	32	182	214	0.00231	1.843	1.751
1/8'	2	10	45.4		35	70	105	0.00144	1.927	1.894
1/8	2	10	45.4		19	106	125	0.00213	1.420	1.775
1/8'	2	10	45.4		22	126	148	0.00197	1.528	1.799
1/8	2	10	45.4		30	149	179	0.00227	1.784	1.757
1/8'	2	10	45.4	飽和3	21	180	201	0.00218	1.493	1.768
1/8	2	10	45.4		22	201	223	0.00194	1.528	1.804
1/8'	2	10	45.4		35	70	105	0.00180	1.927	1.827
1/8	2	10	45.4		19	106	125	0.00242	1.420	1.739
1/8'	2	10	45.4		22	126	148	0.00369	1.528	1.620
1/8	2	10	45.4	乾燥1	30	149	179	0.00191	1.784	1.808
1/8'	2	10	45.4		21	180	201	0.00434	1.493	1.577
1/8	2	10	45.4		22	201	223	0.00186	1.528	1.816
1/8'	2	10	45.4		35	70	105	0.00189	1.927	1.812
1/8	2	10	45.4		19	106	125	0.00222	1.420	1.763
1/8'	2	10	45.4	乾燥2	19	126	145	0.00473	1.420	1.554
1/8	2	10	45.4		33	146	179	0.00145	1.871	1.893
1/8'	2	10	45.4		21	180	201	0.00483	1.493	1.549
1/8	2	10	45.4		31	201	232	0.00117	1.814	1.961
1/8'	2	10	45.4		27	70	97	0.00251	1.693	1.728
1/8	2	10	45.4	乾燥3	27	98	125	0.00186	1.693	1.817
1/8'	2	10	45.4		22	126	148	0.00366	1.528	1.622
1/8	2	10	45.4		27	149	176	0.00200	1.693	1.795
1/8'	2	10	45.4		24	177	201	0.00516	1.596	1.532
1/8	2	10	45.4		31	201	232	0.00170	1.814	1.844
1/8'	2	10	45.4	乾燥4	35	70	105	0.00255	1.927	1.723
1/8	2	10	45.4		19	106	125	0.00199	1.420	1.796
1/8'	2	10	45.4		19	126	145	0.00425	1.420	1.582
1/8	2	10	45.4		30	146	176	0.00150	1.784	1.882
1/8'	2	10	45.4		24	177	201	0.00446	1.596	1.570
1/8	2	10	45.4		31	201	232	0.00126	1.814	1.938

表 4.3.1-9 1/8'+1/8+1/8' +1/8+1/8' +1/8(各 2m) の場合の管径の評価結果のまとめ

管径 (inch)	設計値 (mm)	到達時間から		圧力勾配から	
		飽和	乾燥	飽和	乾燥
1/8'	1.76	1.88±0.08	1.85±0.14	1.82±0.08	1.75±0.05
1/8	2.18	1.43±0.02	1.51±0.16	1.73±0.05	1.79±0.03
1/8'	1.76	1.44±0.15	1.46±0.06	1.66±0.12	1.59±0.03
1/8	2.18	1.75±0.05	1.78±0.09	1.76±0.04	1.86±0.05
1/8'	1.76	1.42±0.13	1.56±0.06	1.62±0.14	1.55±0.02
1/8	2.18	1.63±0.18	1.81±0.00	1.79±0.03	1.91±0.06

表 4.3.1-10 3/16+1/8+1/8'+3/16+1/8+1/8' (各 2m) の場合の管径の評価結果

管	長さ	流量	粘性	条件	圧力勾配			傾き	管径	
	L	Q	μ		一定時間	開始	終了	a	到達時間から	圧力勾配から
	m	cc/min	cp		s	s	s	Mpa/s	mm	mm
3/16	2	9.9	117.7	飽和1	83	80	163	0.00010	2.960	3.439
1/8	2	9.9	117.7		36	164	200	0.00074	1.949	2.476
1/8'	2	9.9	117.7		63	201	264	0.00554	2.579	1.772
3/16	2	9.9	117.7		47	265	312	0.00080	2.227	2.444
1/8	2	9.9	117.7		35	312	347	0.00220	1.922	2.067
1/8'	2	9.9	117.7		28	348	376	0.00534	1.719	1.783
3/16	2	9.7	117.7	飽和2	83	80	163	0.00013	2.916	3.258
1/8	2	9.7	117.7		36	164	200	0.00076	1.920	2.442
1/8'	2	9.7	117.7		63	201	264	0.00585	2.540	1.738
3/16	2	9.7	117.7		70	265	335	0.00116	2.677	2.275
1/8	2	9.7	117.7		32	336	368	0.00373	1.810	1.873
1/8'	2	9.7	117.7		50	369	419	0.00337	2.263	1.906
3/16	2	9.9	117.7	飽和3	83	80	163	0.00014	2.952	3.280
1/8	2	9.9	117.7		31	164	195	0.00065	1.804	2.526
1/8'	2	9.9	117.7		82	196	278	0.00504	2.934	1.796
3/16	2	9.9	117.7		56	279	335	0.00103	2.425	2.340
1/8	2	9.9	117.7		10	336	346	0.00327	1.025	1.931
1/8'	2	9.9	117.7		50	347	397	0.00411	2.291	1.859
3/16	2	9.3	117.7	乾燥1	83	80	163	0.00018	2.860	3.072
1/8	2	9.3	117.7		31	164	195	0.00312	1.748	1.906
1/8'	2	9.3	117.7		29	196	225	0.00862	1.690	1.609
3/16	2	9.3	117.7		82	226	308	0.00081	2.843	2.386
1/8	2	9.3	117.7		31	309	340	0.00334	1.748	1.884
1/8'	2	9.3	117.7		20	341	361	0.00932	1.404	1.588
3/16	2	9.3	117.7	乾燥2	83	80	163	0.00022	2.867	2.972
1/8	2	9.3	117.7		31	164	195	0.00286	1.752	1.936
1/8'	2	9.3	117.7		29	196	225	0.00812	1.695	1.627
3/16	2	9.3	117.7		82	226	308	0.00170	2.850	2.112
1/8	2	9.3	117.7		31	309	340	0.00374	1.752	1.852
1/8'	2	9.3	117.7		20	341	361	0.01031	1.407	1.564
3/16	2	9.8	117.7	乾燥3	83	80	163	0.00021	2.931	3.047
1/8	2	9.8	117.7		31	164	195	0.00355	1.791	1.895
1/8'	2	9.8	117.7		29	196	225	0.00961	1.732	1.606
3/16	2	9.8	117.7		82	226	308	0.00071	2.913	2.478
1/8	2	9.8	117.7		31	309	340	0.00441	1.791	1.828
1/8'	2	9.8	117.7		20	341	361	0.01146	1.439	1.559

表 4.3.1-11 3/16+1/8+1/8'+3/16+1/8+1/8' (各 2m) の場合の管径の評価結果のまとめ

管径 (inch)	設計値 (mm)	到達時間から		圧力勾配から	
		飽和	乾燥	飽和	乾燥
3/16	2.98	2.94±0.02	2.89±0.04	3.33±0.10	3.03±0.05
1/8	2.18	1.89±0.08	1.76±0.02	2.48±0.04	1.91±0.02
1/8'	1.76	2.68±0.22	1.71±0.02	1.77±0.03	1.61±0.01
3/16	2.98	2.44±0.23	2.87±0.04	2.35±0.09	2.33±0.19
1/8'	1.76	1.59±0.49	1.76±0.02	1.96±0.10	1.85±0.03
1/8	2.18	2.09±0.32	1.42±0.02	1.85±0.06	1.57±0.02

4.3.2 軸対称モデルを用いた高粘性流体試験

(1) 試験条件

軸対称モデルでは、高粘性流体が軸対称で流動することを前提としている。高粘性流体の注入により、軸対称モデルにおいて、流れの次元や割れ目の幅が適切に評価できるかどうかを検討する。特に、軸対称モデルでは昨年度までに十分に理論と一致した圧力応答が得られなかったため、新しく試験装置を作成した。また、軸対称流動は、原位置における割れ目内での流動状態に近いと考えられ、このような状態で適切に評価することができれば、原位置でも流れの次元や割れ目の幅が評価できるものと考えられる。また、原位置試験において二段階の透水係数場が存在すると考えられる場が存在したため、このような透水係数場を設定した場合に、注入圧力が同様の挙動を示すかを検討した。

(2) 軸対称割れ目モデルの理論式

軸対称モデルに対する理論式を誘導する。軸対称流動の場合、流量の連続性から、動水勾配と流量の関係は次式で与えられる。この式は、井戸からの任意の距離 r での断面流量は、流量の連続性から同じになるため、距離 r における流量と動水勾配の関係が以下のように定まる。

$$Q_o = -2\pi r \frac{T}{\mu} \frac{\partial h}{\partial r} \quad (4.3.2-1)$$

ここに、 Q_o は注入流量、 r は井戸からの距離、 b は割れ目幅、 k は透水係数、 μ は高粘性流体の粘性、 h は圧力である。

高粘性流体が R まで到達したとき、到達距離での圧力を 0、この時の注入孔 r_o での圧力を H として積分すると以下の式が誘導される。

$$Q_o = \frac{2\pi H}{\ln(R/r_o)} \frac{T}{\mu} \quad (4.3.2-2)$$

また、定流量注入では総流入量と注入範囲の関係は次式で与えられる。

$$Q_o t = \pi b (R^2 - r_o^2) \quad (4.3.2-3)$$

この式は、割れ目内に高粘性流体が広がる場合の累積注入量と注入範囲の関係を表している。この式から、到達距離 R は以下のように与えられる。

$$R = \sqrt{\frac{Q_o t}{\pi b} + r_o^2} \quad (4.3.2-4)$$

この関係を式(4.3.2-2)に代入すると、流量と圧力の関係が次式で与えられる。

$$H = \frac{\mu Q_o}{4\pi T} \ln \frac{\left(\frac{Q_o t}{\pi b} + r_o^2 \right)}{r_o^2} \quad (4.3.2-5)$$

このように、圧力の上昇は時間に依存する。ここで、注入範囲が広がれば、 r_o の影響は小さくなる。これは、式(4.3.2-3)および式(4.3.2-4)から、注入範囲 R が広がれば、以下のような近似が成り立つと考えられるためである。

$$R = \sqrt{\frac{Q_o t}{\pi b} + r_o^2} \approx \sqrt{\frac{Q_o t}{\pi b}} \quad (4.3.2-6)$$

上式により、式(4.3.2-5)は以下のように近似でき、圧力と時間の関係が得られる。

$$H = \frac{\mu Q_o}{4\pi T} \ln \left(\frac{Q_o t}{\pi b r_o^2} \right) \quad (4.3.2-7)$$

(3) 評価方法

1) Jacob 的な評価方法

ここでは、高粘性流体の注入圧力の変化に基づいて、Jacob の方法と同様に図解法で評価する方法について述べる。軸対称モデルに高粘性流体を定流量で注入した場合、注入圧力は式(4.3.2-7)で与えられる。試験結果では圧力の経時変化は図 4.3.2-1 のように与えられる。この試験結果から、透水量係数や割れ目幅は以下のように求めることができる。

式(4.3.2-7)は以下のように展開できる。

$$H = \frac{2.3\mu Q_o}{4\pi T} \left\{ \log \left(\frac{Q_o}{\pi b r_o^2} \right) + \log(t) \right\} \quad (4.3.2-8)$$

上式は、透水量係数(T)が一定であれば、 $\log(t)$ に対して一定の勾配を持つため、圧力を正規軸、時間を対数軸で図化し、その傾きを求めれば、以下の関係から透水量係数が求められる。

$$T = \frac{2.3\mu Q_o}{4\pi} \cdot \frac{1}{m} \quad (4.3.2-9)$$

ここに、 m は $H-\log t$ プロット上での近似直線の傾きである。

次に、割れ目幅(b)は $H=0$ となる時間(t_0)から、以下のように求めることができる。

$$b = \frac{Q_o t_0}{\pi r_o^2} \quad \left[\log \left(\frac{Q_o}{\pi b} \right) + \log(t) = 0 \right] \quad (4.3.2-10)$$

このように透水量係数と割れ目幅を求めることが可能である。

具体的には、定流量注入時の圧力の変化は、軸対称流を仮定すると図 4.3.2-1 のように与えられる。ここに注入条件は図に示した通りである。透水量係数や割れ目幅を求めるためには、式(4.3.2-8)に示すように、 $H-\log t$ とする必要がある。このように整理しなおしたものを図 4.3.2-2 に示す。透水量係数は $H-\log t$ の傾きとして与えられるため、回帰分析を行う。回帰分析の結果から得られた傾きと注入条件を考慮して、式(4.3.2-9)から透水量係数が求められる。割れ目幅についても同様に回帰曲線

の x 切片と注入条件を考慮して式(4.3.2-10)から計算することができる。

この方法は非定常の透水試験結果を評価する際の Jacob の方法とほぼ同じであり、Jacob の方法では傾きから透水量係数、切片から貯留係数が求められる。高粘性流体試験では、傾きから透水量係数、切片から割れ目幅が求められる。

ただし、高粘性流体試験では、式(4.3.2-7)の浸潤距離の近似によって誤差が発生する。透水試験の場合には貯留係数が小さく影響圏は十分に広がるため、式(4.3.2-7)の近似は妥当であるが、高粘性流体の注入試験においては、高粘性流体の広がりや注入孔径に対して十分に広いとはいえない場合がある。このため、高粘性の広がりが小さいほど近似誤差が大きくなり、推定結果が誤差を含むこととなる。この関係を明確にするために、注入条件に基づいて式(4.3.2-5)で計算した圧力を、高粘性流体の広がりが 0.3, 0.5, 0.7 m などやや狭い状態で、傾きや切片を計算した結果を表 4.3.2-1 に示す。表には、これらの傾きや切片から推定される透水量係数と割れ目幅もあわせて示す。

表 4.3.2-1 から高粘性流体が広がるほど透水量係数と割れ目幅が設定値、圧力を計算するための設定値に近づいているのがわかる。特徴として透水量係数の方が割れ目幅に比べて設定値に近いことがわかる。今の実験装置は 70cm 程度であり、表に基づけば透水量係数は 5%程度の過大評価が予想され、割れ目幅は 20%程度の過小評価が予想される。このように、近似誤差が評価結果に与える影響があるが、原位置試験では試験装置と異なり比較的広範囲に高粘性流体を注入することができることから、原位置試験ではこのような近似誤差の影響は小さいと考えられる。

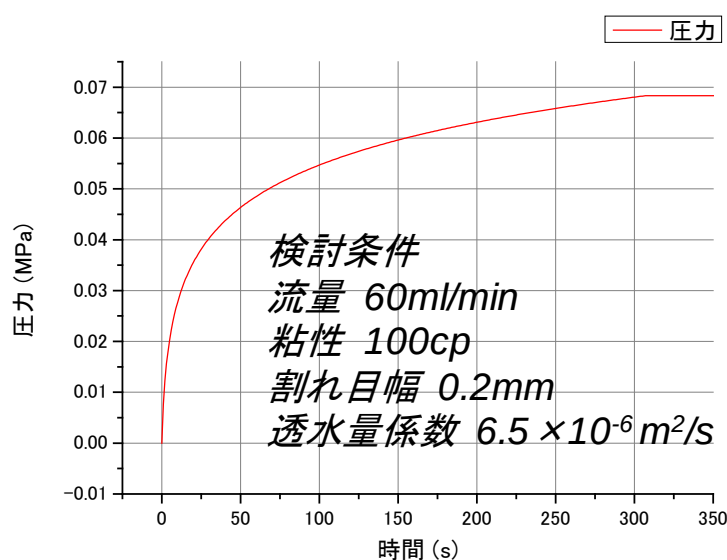


図 4.3.2-1 高粘性流体の注入圧力の経時変化

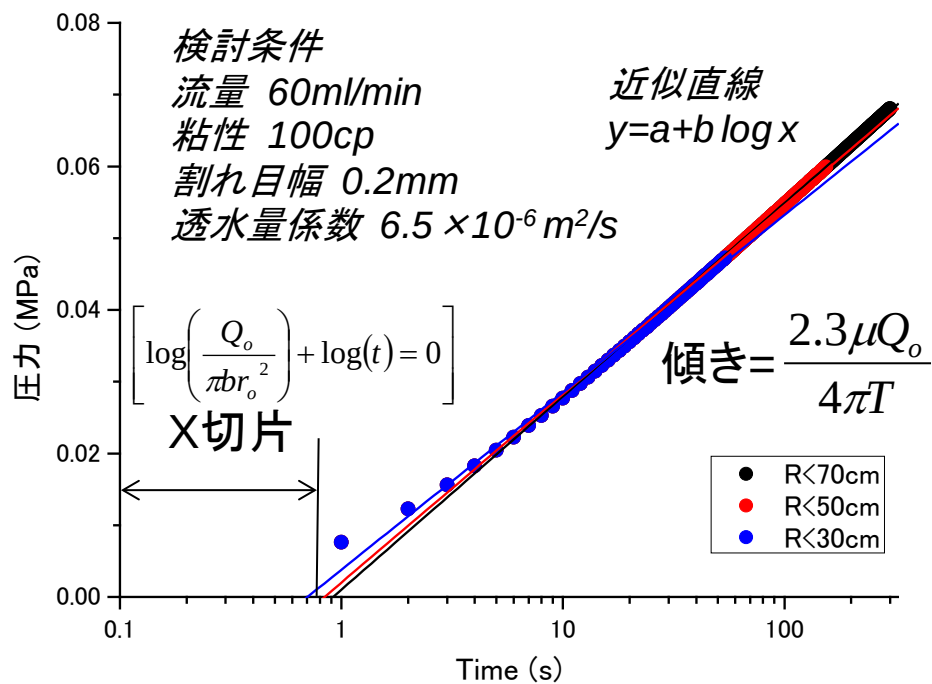


図 4. 3. 2-2 Jacob 的な評価方法の概念図

R は高粘性流体の広がりを意味し、ここでは広がりが 30, 50, 70cm 迄の実験結果を整理したと想定して回帰分析を実施した。

表 4. 3. 2-1 高粘性流体の広がりによる評価結果の変化

広がり(cm)	透水量係数 (m ² /s)	割れ目幅 (mm)
30	7.4×10^{-6}	0.121
50	7.0×10^{-6}	0.144
70	6.8×10^{-6}	0.158
100	6.7×10^{-6}	0.170
200	6.6×10^{-6}	0.185
500	6.5×10^{-6}	0.195
∞	6.5×10^{-6}	0.200

2) 時間微分による評価方法

前述のように Jacob 的な方法では近似誤差が大きいこと、原位置の割れ目は不均質であることが想定されるため、高粘性流体の注入圧力の時間微分に基づいて透水量係数の時間的な変化や割れ目幅を評価する方法を考えた。軸対称モデルに高粘性流体を定流量で注入した場合、注入圧力は式(4.3.2-7)で与えられる。この式は次式のように表すことができる。

$$H = \frac{\mu Q_o}{4\pi T} \left[\ln \left(\frac{Q_o}{\pi b r_o^2} \right) + \ln t \right] \quad (4.3.2-11)$$

この時間微分は次式のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\mu Q_o}{4\pi T} \frac{1}{t} \quad (4.3.2-12)$$

上式を展開すると透水量係数は以下で求められる。

$$T = \frac{\mu Q_o}{4\pi a} \frac{1}{t} \quad \left(a = \frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad (4.3.2-13)$$

ここに、 a は注入圧力の時間微分 ($\partial H / \partial t$) である。

次に割れ目幅は、式(4.2.2-7)を次式のように表す。

$$H = \frac{\mu Q_o}{4\pi T} \left[\ln \left(\frac{Q_o t}{\pi r_o^2} \right) - \ln b \right] \quad (4.3.2-14)$$

上式を展開すると割れ目幅は以下のように表される。

$$b = \exp \left[-\frac{4\pi TH}{\mu Q_o} + \ln \left(\frac{Q_o t}{\pi r_o^2} \right) \right] \quad (4.3.2-15)$$

ここに、割れ目幅の算出には時間微分を用いていない。このため、割れ目幅は平均的な透水量係数に基づいて、平均的な割れ目幅しか求められない。

Jacob 的な方法でも述べたように、時間微分に基づく方法でも、浸潤距離の近似によって誤差が発生することが考えられる。このため、この影響について Jacob 的な方法と同様に検討する。

近似誤差の影響を検討する注入条件は Jacob の方法と同じとした。このため、図 4.3.2-1 のような注入圧力の経時変化になり、そのときの高粘性流体の広がり図 4.3.2-3 に示すとおりである。図の圧力の時間微分を求め、注入条件などから式(4.3.2-13)によって透水量係数、式(4.3.2-15)によって割れ目幅を計算した結果を図 4.3.2-4 に示す。Jacob 的な方法と同様に、透水量係数は比較的収束が速いが、割れ目幅はかなり長い時間にわたって誤差が残る。割れ目幅は式(4.3.2-15)に表されるように、透水量係数や試験条件の指数関数として表されており、平均的な透水量係数に基づいて評価されるため、透水量係数などの推定誤差が予想以上に大きく反映される可能性が高い。また、透水量係数が増加する場合には式の適用条件を満足していないことに注意が必要である。

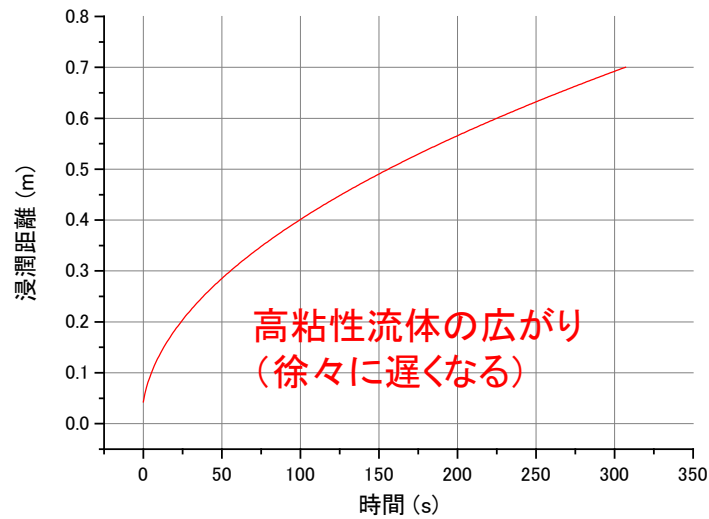


図 4. 3. 2-3 高粘性流体の浸潤前線の広がり

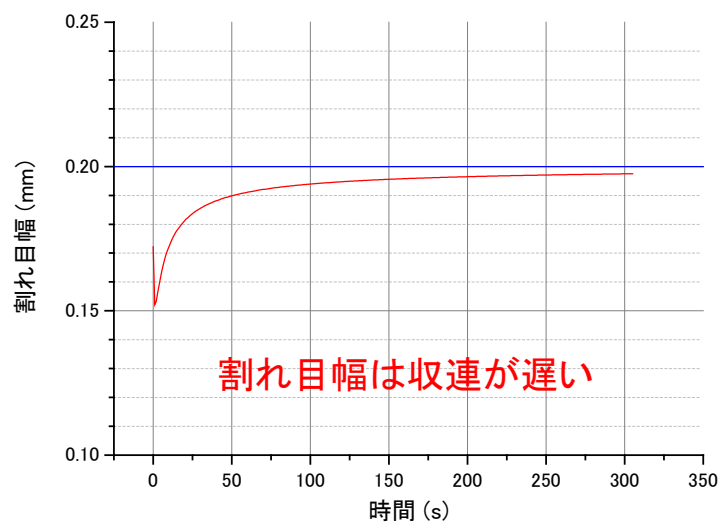
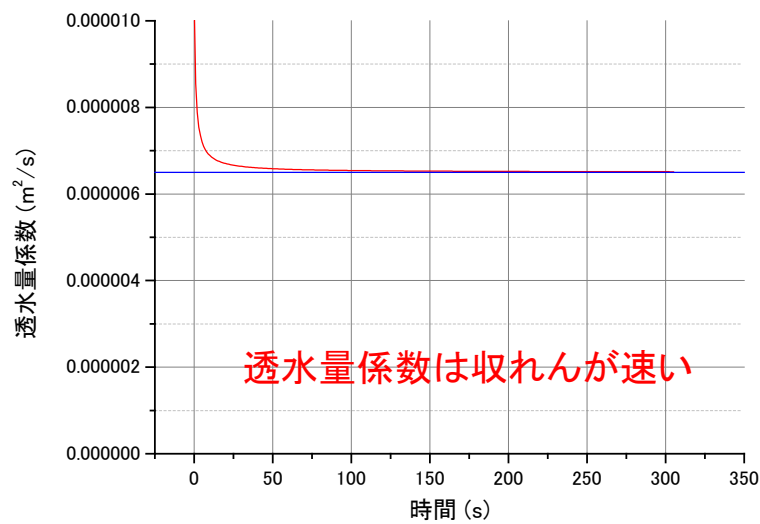


図 4. 3. 2-4 高粘性流体試験における透水量係数と割れ目幅の時間的な評価結果の変化

(3) 試験方法および試験ケース

軸対称割れ目モデルの実験装置の概念図を図 4.3.2-5 に示す。前述の理論式に示すように、定流量注入により試験を実施した。割れ目モデルは、ステンレス板とアクリル板とを重ね、その間にスペーサーを挟むことによって所定の割れ目幅が得られるようにした。モデル中央部から流出端までの半径は 700 mm で、注入孔の半径は一般的なボーリング孔径を考慮して 86mm 程度となるように製作した。圧力の観測点は、注入箇所、流出箇所とそれらを補間するために、5ヶ所に配置した。

ここでは、流量、高粘性流体の粘性、割れ目幅をパラメーターとして試験を実施した。実験は同一条件で割れ目内が水で満たされている状態(飽和状態)と乾燥している状態を各 3 回実施し、再現性を確認した。

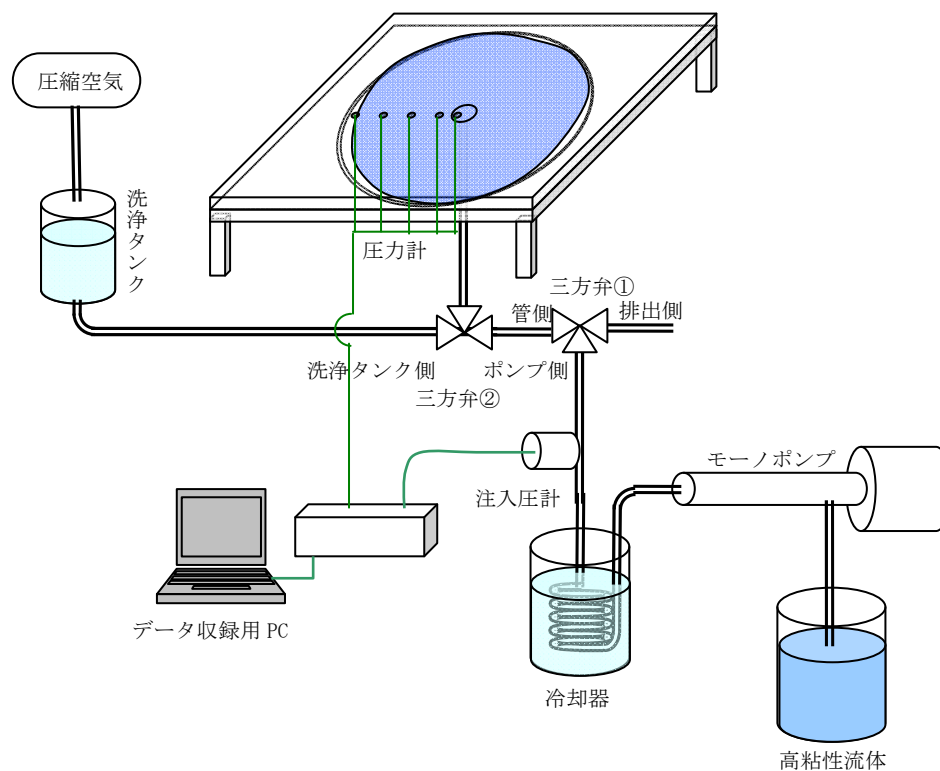


図 4.3.2-5 軸対称割れ目モデル図

(4) 単一割れ目幅での試験結果

割れ目幅を軸対称モデル全面において一定として試験を実施した。実験の実施状況の写真を図 4.3.2-6 に示す。

高粘性流体の注入試験は、割れ目幅、高粘性流体の粘性、流量をパラメーターとして実施した。試験結果を表 4.3.2-2 に示す。表において、①透水量係数は、定常状態の圧力に基づいて求めた透水量係数、①割れ目幅は、①透水量係数から割れ目幅の三乗則によって求めた割れ目幅である。透水量係数の計算式と割れ目幅の計算式を以下に示す。

$$T = \frac{\mu Q_o}{2\pi H} \ln\left(\frac{R}{r_o}\right) \quad (4.3.2-16)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{12\nu T}{g}} \quad (4.3.2-17)$$

ここに、 T は透水量係数(m^2/s)、 μ は高粘性流体の粘性、 Q_o は注入流量、 H は定常圧力、 R は影響圏半径(ここでは700mm)、 r_o は井戸半径(ここでは43mm)、 b は割れ目幅、 ν は水の動粘性係数($\approx 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)、 g は重力加速度である。

また、表 4.3.2-2 の②透水量係数と②割れ目幅は、式(4.3.2-9)と式(4.3.2-10)に基づいて求めたものである。

軸対称割れ目モデルにおける高粘性流体注入時の注入圧力の時間変化を図 4.3.2-7～図 4.3.2-9 に示す。図には、②透水量係数を用いて割れ目幅を仮定して圧力の時間変化を求めたものを合わせて図化した。

さらに、注入圧力の時間微分に基づいて、式(4.3.2-13)から透水量係数の時間変化を求めたものを図 4.3.2-10～図 4.3.2-12 に示す。

今年度の試験結果では、全円にわたって割れ目幅が制御できているため、概ね理論と同等の圧力上昇となっている。また、割れ目内が飽和状態と乾燥状態とで、両者に大きな差がない結果となっている。このため、割れ目モデルでは飽和状態と乾燥状態とで圧力上昇に大きな差がないことがわかった。割れ目の透水量係数の評価結果については、表 4.3.2-2 に示すように、定常状態での圧力と非定常状態での傾きから求めた透水量係数はほぼ同じ値が得られている。一方で、非定常の圧力勾配から求めた割れ目幅についてはバラツキが大きい結果となっている。これは全体的には割れ目幅が0.2 mmであっても、非定常過程に基づいて割れ目幅を求める場合には、局所的な透水係数の影響を強く受けるためではないかと考えられる。表 4.3.2-2 の3乗則から求められる①割れ目幅と圧力勾配から求められる②割れ目幅では、圧力勾配から求められる②割れ目幅の方が小さくなっている。これは前述の Jacob 的な方法で述べたように、高粘性流体の広がりに対する近似誤差の影響であると考えられる。これは図 4.3.2-7～図 4.3.2-9 において、実測値と理論曲線との整合性から求められる割れ目幅(図中の近似

線を参照)とが概ね設定した割れ目幅に一致していることから明らかである。ここに、理論曲線は、式(4.3.2-5)から計算しているため、高粘性流体の広がりに対する近似誤差を含んでいない。

表 4.3.2-2 の割れ目幅 0.3mm の場合の圧力勾配から求めた②割れ目幅が非常に小さくなっているが、これは試験での圧力上昇が有意でなかったためにこのようになったと推定される。

図 4.3.2-10～図 4.3.2-12 に示した透水係数の時間微分では、透水量係数に誤差が大きい場合と小さい場合の差が大きい。これは、ポンプの流量のバラツキに起因するものであると考えられる。このポンプでは 60ml/min において流量制御が良いが、ここから小さくなるにしたがって流量にバラツキが大きくなるようであり、60ml/min の結果は透水量係数が安定しているが、30ml/min、15ml/min と小さくなるにつれて透水量係数のバラツキが大きくなっている傾向がある。

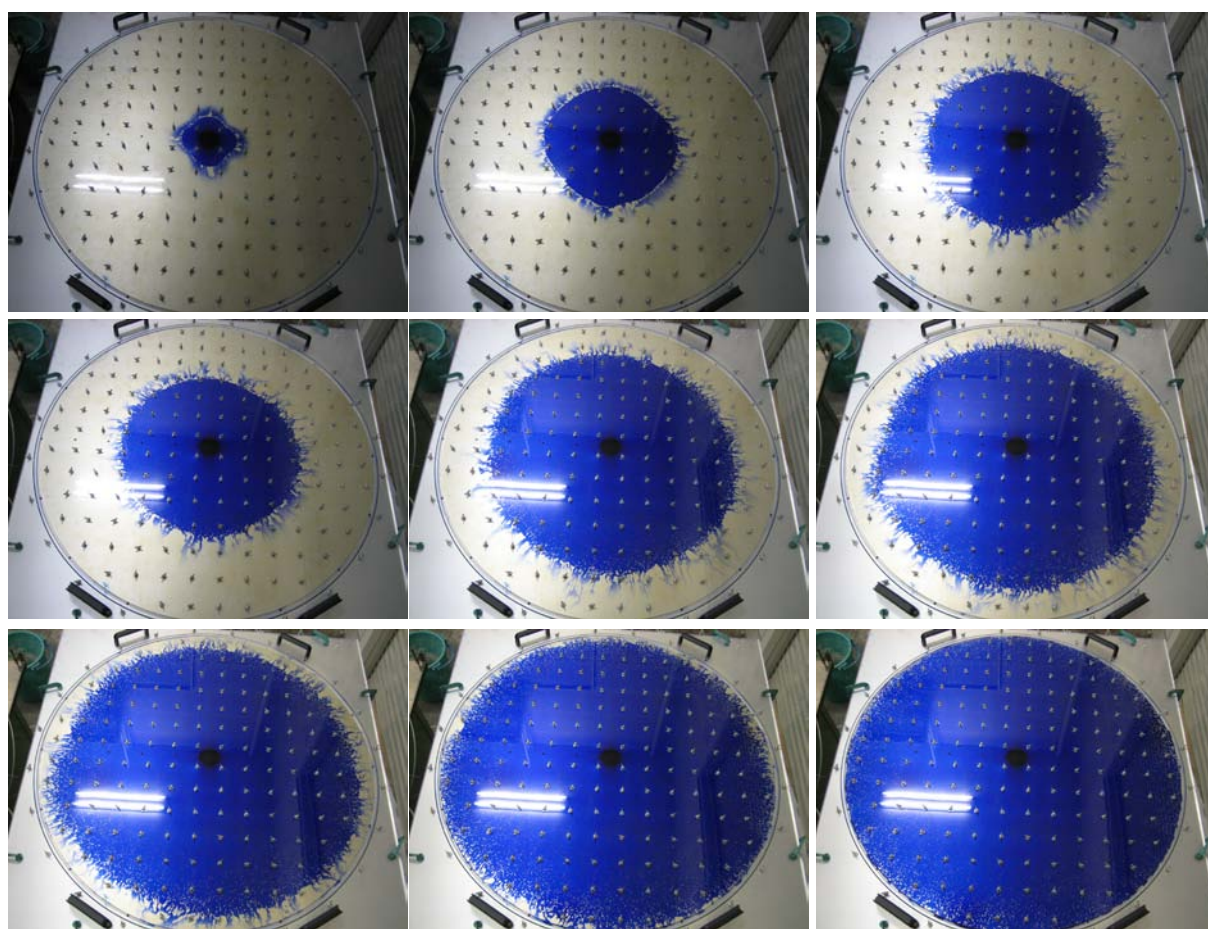
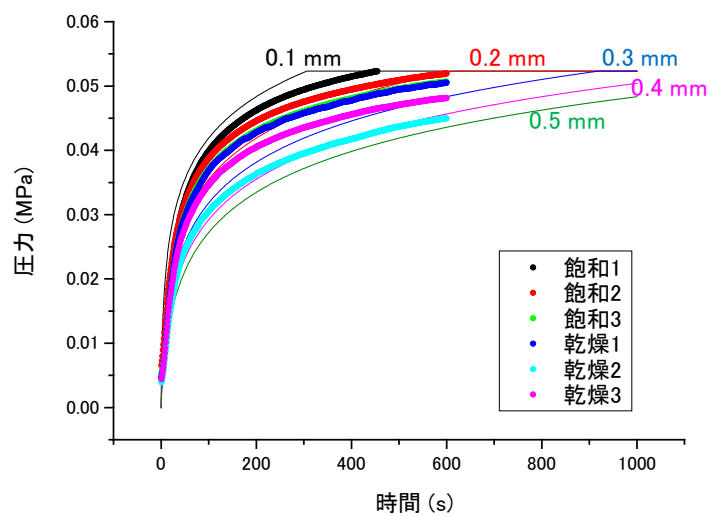


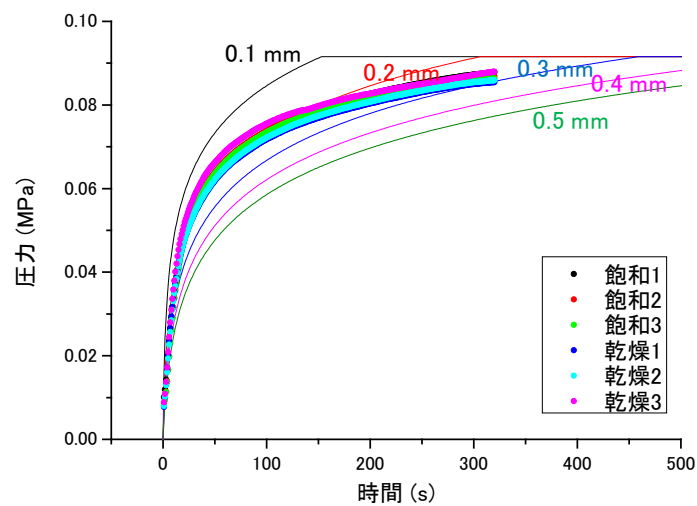
図 4.3.2-6 軸対称割れ目モデルでの試験状況

表 4.3.2-2 軸対称割れ目モデルでの試験結果

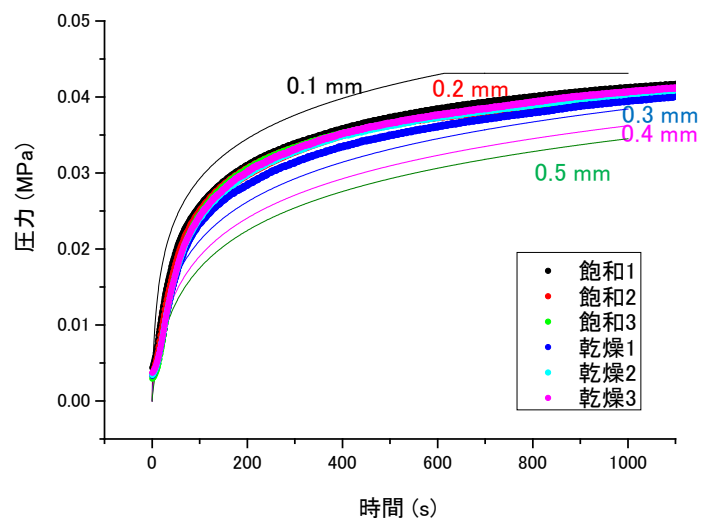
割れ目幅	流量	粘性	定常圧力	①透水量係数	①割れ目幅	傾き	切片	②透水量係数	②割れ目幅
mm	ml/min	cp	Mpa	m ² /s	mm	Mpa/s	s	m ² /s	mm
0.2	30.2	168	0.054	7.1E-06	0.206	0.0217	1.66	7.1E-06	0.144
0.2	30.0	168	0.052	7.3E-06	0.208	0.0212	1.83	7.3E-06	0.158
0.2	30.0	168	0.051	7.5E-06	0.209	0.0205	1.76	7.5E-06	0.151
0.2	29.9	168	0.051	7.5E-06	0.210	0.0204	1.79	7.5E-06	0.154
0.2	29.7	168	0.046	8.3E-06	0.217	0.0191	2.60	8.0E-06	0.222
0.2	29.2	168	0.049	7.6E-06	0.211	0.0197	1.91	7.6E-06	0.160
0.2	60.4	169	0.088	8.8E-06	0.221	0.0347	0.82	9.0E-06	0.142
0.2	60.4	169	0.088	8.8E-06	0.221	0.0349	0.87	8.9E-06	0.150
0.2	60.5	169	0.087	8.9E-06	0.222	0.0348	0.87	9.0E-06	0.152
0.2	61.2	169	0.085	9.2E-06	0.224	0.0337	0.81	9.3E-06	0.142
0.2	61.3	169	0.086	9.1E-06	0.224	0.0342	0.84	9.2E-06	0.148
0.2	61.1	169	0.090	8.7E-06	0.220	0.0329	0.58	9.6E-06	0.101
0.2	15.5	233	0.042	6.5E-06	0.200	0.0160	2.52	6.9E-06	0.112
0.2	15.0	233	0.041	6.5E-06	0.200	0.0158	2.70	6.8E-06	0.116
0.2	15.0	233	0.041	6.5E-06	0.199	0.0166	3.53	6.4E-06	0.152
0.2	15.0	233	0.041	6.5E-06	0.200	0.0167	4.28	6.4E-06	0.184
0.2	15.0	233	0.042	6.4E-06	0.198	0.0169	3.89	6.3E-06	0.168
0.2	15.0	233	0.042	6.4E-06	0.198	0.0170	3.81	6.3E-06	0.164
0.2	30.4	259	0.076	7.8E-06	0.213	0.0312	1.66	7.7E-06	0.145
0.2	30.9	259	0.077	7.9E-06	0.213	0.0325	1.84	7.5E-06	0.163
0.2	30.9	259	0.078	7.8E-06	0.212	0.0329	1.80	7.4E-06	0.159
0.2	31.0	259	0.078	7.8E-06	0.212	0.0329	1.84	7.4E-06	0.163
0.2	31.0	259	0.078	7.8E-06	0.213	0.0326	1.69	7.5E-06	0.151
0.2	31.0	259	0.074	8.2E-06	0.216	0.0303	1.78	8.1E-06	0.158
0.3	60.0	215	0.066	1.5E-05	0.263	0.0264	2.03	1.5E-05	0.349
0.3	59.9	215	0.066	1.5E-05	0.263	0.0229	0.64	1.7E-05	0.111
0.3	60.0	215	0.066	1.5E-05	0.263	0.0239	0.76	1.6E-05	0.131
0.3	59.7	215	0.061	1.6E-05	0.269	0.0208	0.62	1.9E-05	0.107
0.3	59.3	215	0.065	1.5E-05	0.262	0.0222	0.50	1.8E-05	0.086
0.3	59.4	215	0.066	1.5E-05	0.262	0.0225	0.56	1.7E-05	0.096
0.3	30.0	215	0.035	1.4E-05	0.257	0.0118	0.73	1.7E-05	0.062
0.3	30.1	215	0.035	1.4E-05	0.258	0.0118	0.71	1.7E-05	0.061
0.3	30.1	215	0.035	1.4E-05	0.258	0.0120	0.75	1.6E-05	0.065
0.3	30.3	215	0.036	1.4E-05	0.257	0.0117	0.66	1.7E-05	0.058
0.3	30.4	215	0.036	1.4E-05	0.256	0.0121	0.72	1.6E-05	0.063
0.3	30.0	215	0.032	1.5E-05	0.264	0.0103	0.62	1.9E-05	0.054
0.15	30.4	114	0.090	2.9E-06	0.153	0.0344	1.00	3.1E-06	0.087
0.15	30.9	114	0.089	3.0E-06	0.154	0.0336	0.92	3.2E-06	0.081
0.15	30.6	114	0.092	2.9E-06	0.152	0.0345	0.85	3.1E-06	0.075
0.15	31.0	114	0.091	2.9E-06	0.153	0.0335	0.78	3.2E-06	0.070
0.15	31.0	114	0.091	2.9E-06	0.153	0.0326	0.70	3.3E-06	0.063
0.15	31.1	114	0.092	2.9E-06	0.153	0.0341	0.84	3.2E-06	0.075
0.15	60.1	114	0.130	4.0E-06	0.170	0.0529	0.71	3.9E-06	0.122
0.15	60.0	114	0.128	4.0E-06	0.170	0.0496	0.59	4.2E-06	0.101
0.15	59.9	114	0.134	3.8E-06	0.168	0.0522	0.54	4.0E-06	0.094
0.15	60.1	114	0.134	3.9E-06	0.168	0.0524	0.56	4.0E-06	0.097
0.15	60.0	114	0.135	3.8E-06	0.167	0.0524	0.53	4.0E-06	0.092
0.15	60.0	114	0.135	3.8E-06	0.167	0.0544	0.65	3.8E-06	0.112



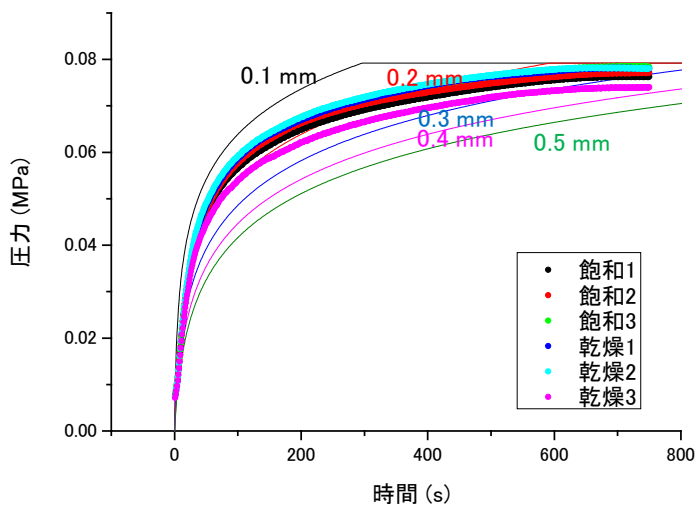
(1) 0.2 mm 30 ml/min, 165 cp



(2) 0.2 mm 60 ml/min, 160 cp



(3) 0.2 mm 15 ml/min, 235 cp



(4) 0.2 mm 30 ml/min, 235 cp

図 4. 3. 2-7 割れ目幅 0.2mm への高粘性流体(100cp 程度)の注入試験結果

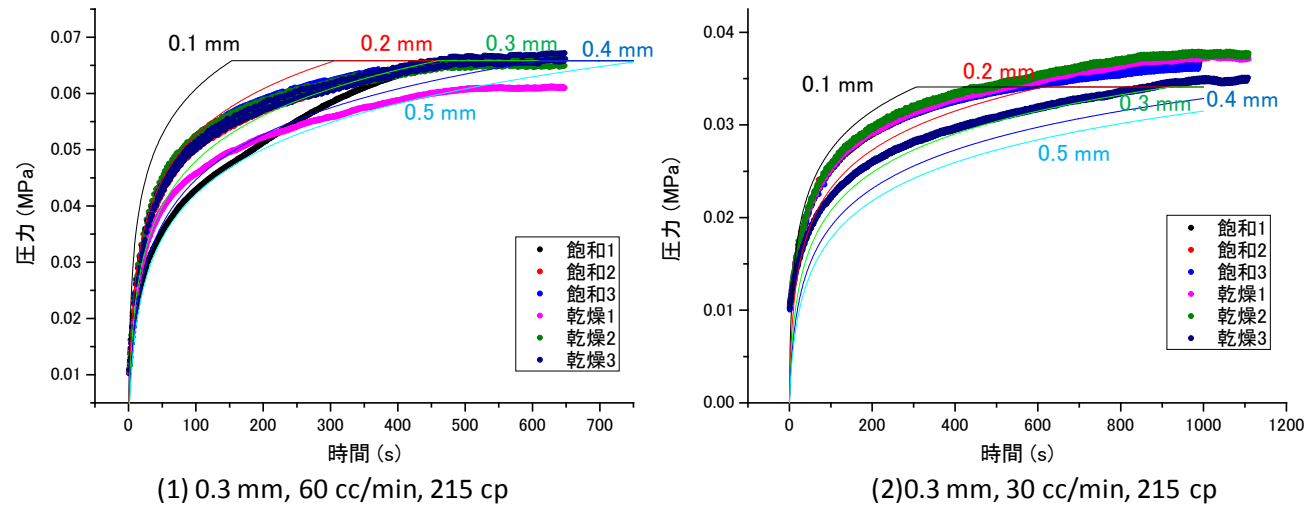


図 4. 3. 2-8 割れ目幅 0.3 mm への高粘性流体(200cp 程度)の注入試験結果

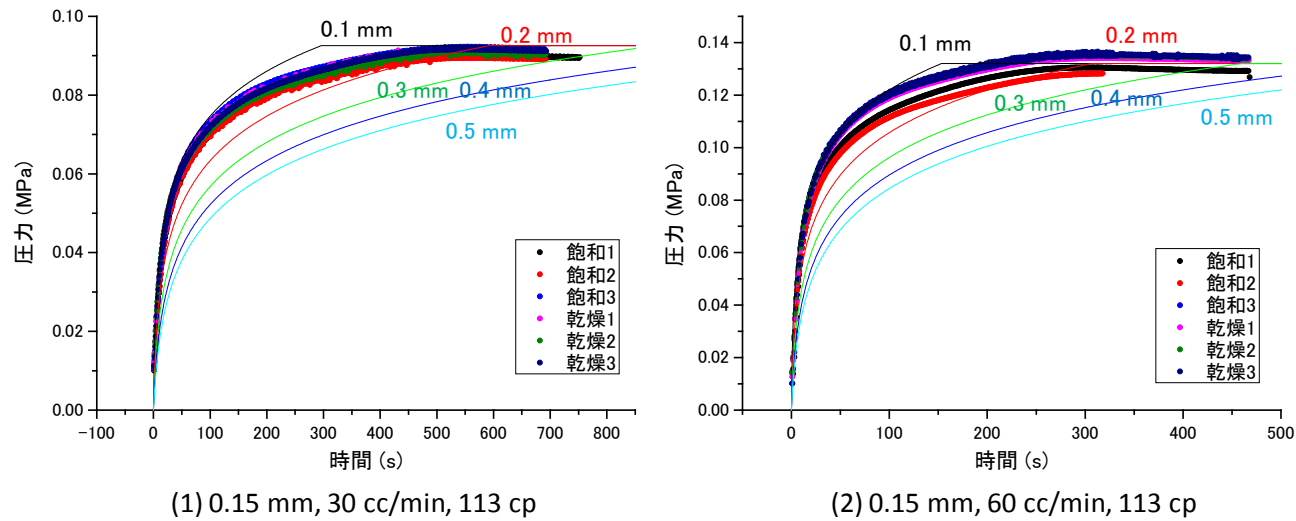
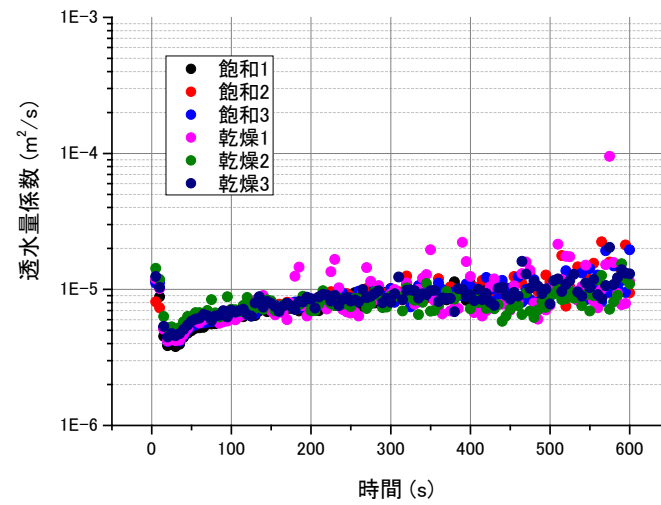
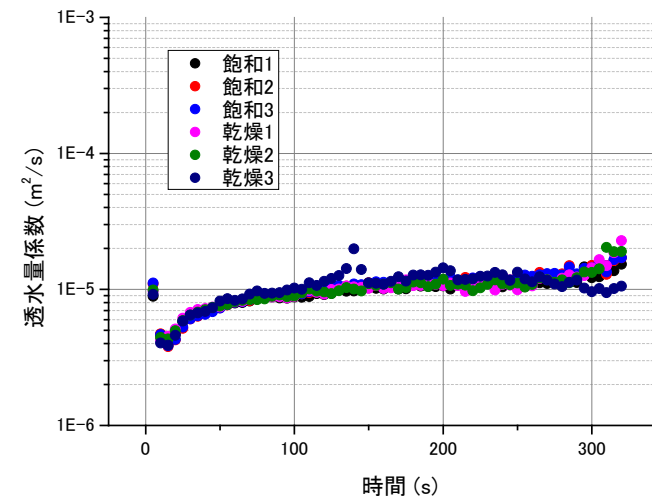


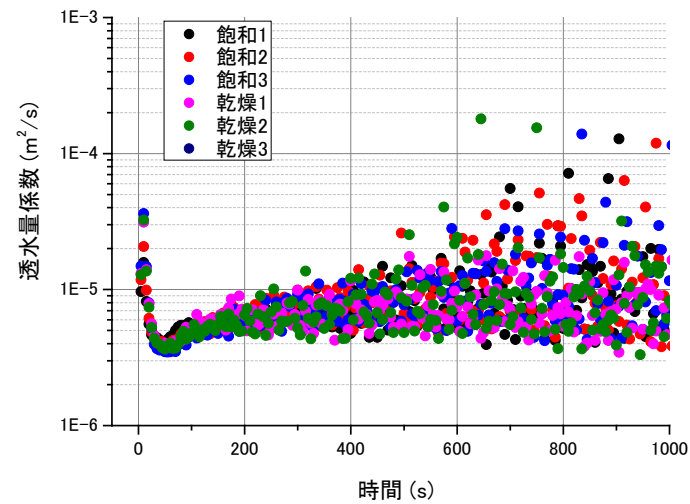
図 4. 3. 2-9 割れ目幅 0.15 mm への高粘性流体(200cp 程度)の注入試験結果



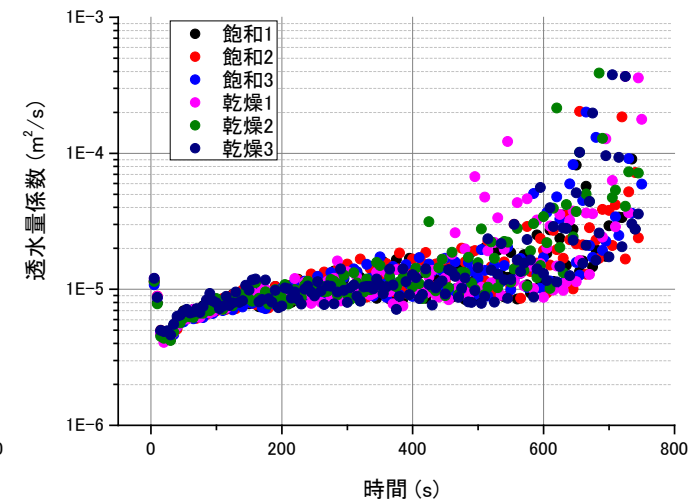
(1) 0.2 mm 30 ml/min, 165 cp



(2) 0.2 mm 60 ml/min, 160 cp

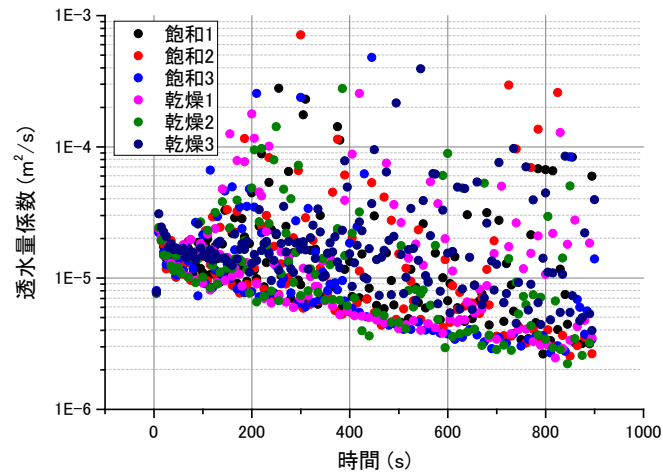


(3) 0.2 mm 15 ml/min, 235 cp

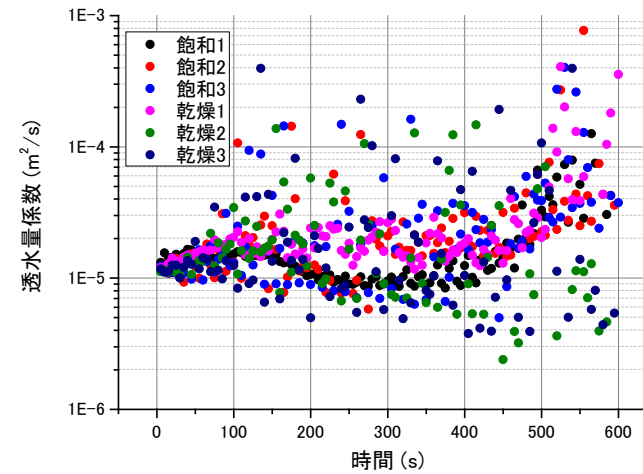


(4) 0.2 mm 30 ml/min, 235 cp

図 4. 3. 2-10 時間微分による透水量係数の評価結果 (割れ目幅 0.2mm)

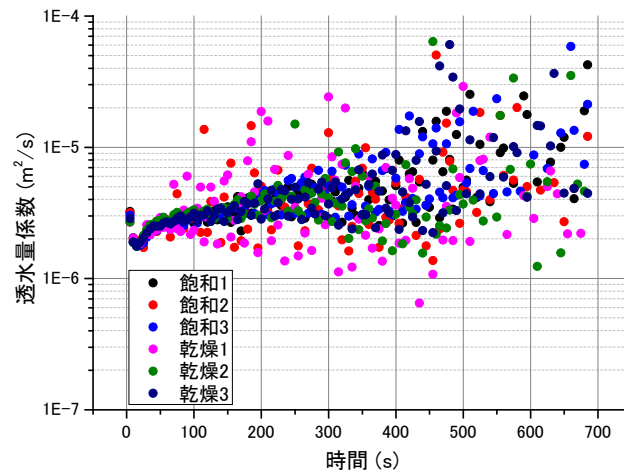


(1) 0.3 mm, 30 cc/min, 215 cp

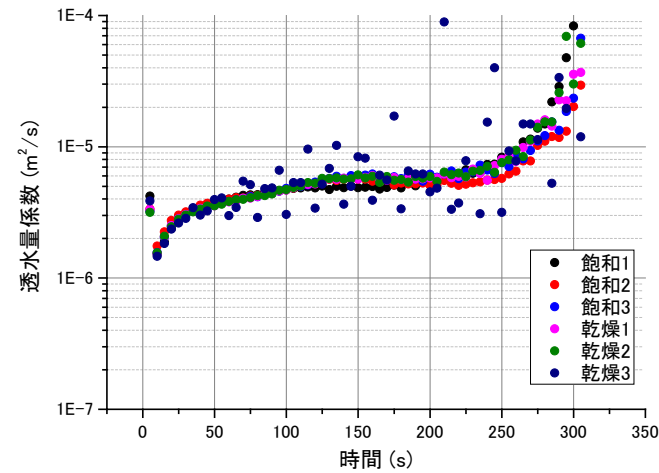


(2) 0.3 mm, 60 cc/min, 215 cp

図 4. 3. 2-11 時間微分による透水量係数の評価結果 (割れ目幅 0.3 mm)



(1) 0.15 mm, 30 cc/min, 113 cp



(2) 0.15 mm, 60 cc/min, 113 cp

図 4. 3. 2-12 時間微分による透水量係数の評価結果 (割れ目幅 0.15 mm)

(5) 割れ目幅が変化する場合の試験結果

軸対称モデルを用いて割れ目幅が変化する場合の試験を実施した。割れ目幅は注入孔からの距離によって異なるスペーサーを用いることによって制御した。

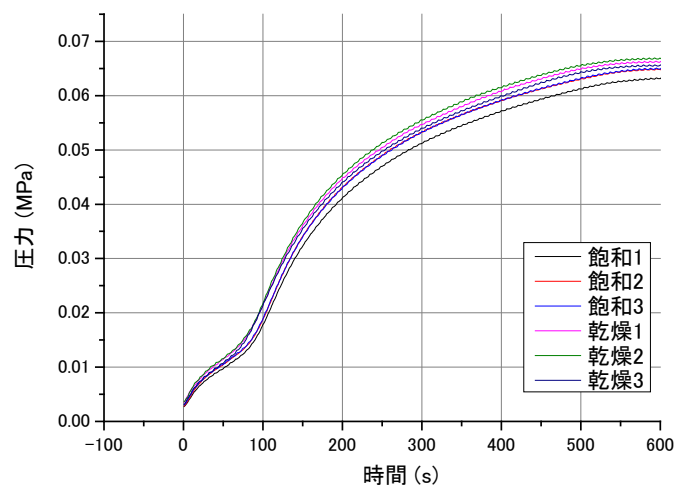
高粘性流体の注入試験は、割れ目幅、高粘性流体の粘性、流量をパラメーターとして実施した。試験結果を表 4.3.2-3 に示す。表の透水量係数と割れ目幅は、Jacob 的な方法、すなわち式(4.3.2-9)と式(4.3.2-10)に基づいて求めたものである。Jacob 的な方法では、二段目以降割れ目幅の評価が困難なため、ここでは二段目以降については割れ目幅を求めている。

軸対称割れ目モデルにおける高粘性流体注入時の注入圧力の時間変化と時間微分に基づく透水量係数の変化を図 4.3.2-13～図 4.3.2-18 に示す。圧力変化は割れ目幅が切り替わる半径を反映して、上昇率が変化しており、割れ目幅は適切に制御されており、高粘性流体の注入圧力も割れ目幅の変化を適切に反映していると考えられる。透水量係数の時間変化も、注入圧力の曲線の変化に伴って変化している。このため、割れ目幅の変化に伴う透水量係数を適切に評価できていると考えられる。

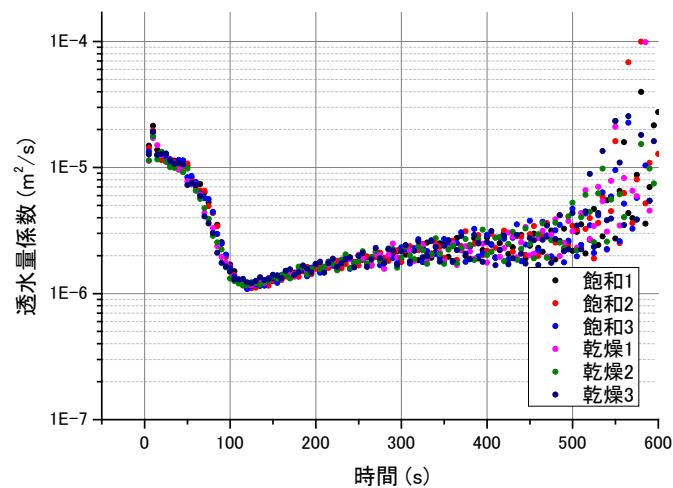
ただし、段階的に割れ目幅が広くなる場合には、圧力上昇が明確でなくなるため鋼管試験と同様に、透水量係数にバラツキが大きくなっている。これは、割れ目幅が広がる場合には、圧力上昇が低下し増加が有意でなくなるため、誤差の影響を受けやすくなるためと考えられる。

表 4. 3. 2-3 割れ目幅が変化する場合の実験結果

割れ目幅の設定	流量平均 (ml/min)	粘性 (cp)	1段目 非定常				2段目 非定常		3段目 非定常	
			透水量係数(m^2/s)		割れ目幅(mm)		透水量係数(m^2/s)		透水量係数(m^2/s)	
			平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
R<0.2 m: 0.3 mm, R>0.2 m: 0.15 mm	31	117	1.54E-05	1.16E-06	0.111	0.061	1.87E-06	2.08E-08	-	-
R<0.2 m: 0.3 mm, R>0.2 m: 0.15 mm	61	117	1.61E-05	1.28E-06	0.209	0.117	2.48E-06	1.11E-07	-	-
R<0.3 m: 0.3 mm, R>0.3 m: 0.15 mm	30	122	1.36E-05	3.29E-07	0.140	0.079	1.62E-06	1.40E-08	-	-
R<0.3 m: 0.3 mm, R>0.3 m: 0.15 mm	60	122	1.36E-05	9.35E-07	0.185	0.108	2.03E-06	1.18E-07	-	-
R<0.4 m: 0.3 mm, R>0.4 m: 0.15 mm	30	112	1.25E-05	1.17E-07	0.200	0.109	1.27E-06	2.31E-08	-	-
R<0.4 m: 0.3 mm, R>0.4 m: 0.15 mm	60	112	1.35E-05	2.57E-07	0.237	0.133	1.67E-06	5.88E-08	-	-
R<0.4 m: 0.15 mm, R>0.4 m: 0.2 mm	31	114	2.61E-06	8.78E-08	0.127	0.071	1.96E-05	5.60E-06	-	-
R<0.4 m: 0.15 mm, R>0.4 m: 0.2 mm	61	114	3.48E-06	2.26E-07	0.129	0.077	2.07E-05	1.43E-06	-	-
R<0.3 m: 0.3 mm, R<0.5 m: 0.2 mm, R<0.7: 0.15 mm	31	117	1.36E-05	5.70E-07	0.185	0.024	3.42E-06	1.50E-07	1.63E-06	6.73E-08
R<0.3 m: 0.3 mm, R<0.5 m: 0.2 mm, R<0.7: 0.15 mm	50	117	1.50E-05	7.20E-07	0.218	0.023	4.08E-06	2.49E-07	2.11E-06	2.43E-07
R<0.3 m: 0.15 mm, R<0.5 m: 0.2 mm, R<0.7: 0.3 mm	50	120	3.12E-06	1.03E-07	0.162	0.018	1.05E-05	9.45E-07	-1.11E-04	1.12E-04
R<0.3 m: 0.15 mm, R<0.5 m: 0.2 mm, R<0.7: 0.3 mm	30	120	2.61E-06	1.60E-07	0.145	0.030	8.67E-06	5.24E-07	-4.40E-05	2.23E-05

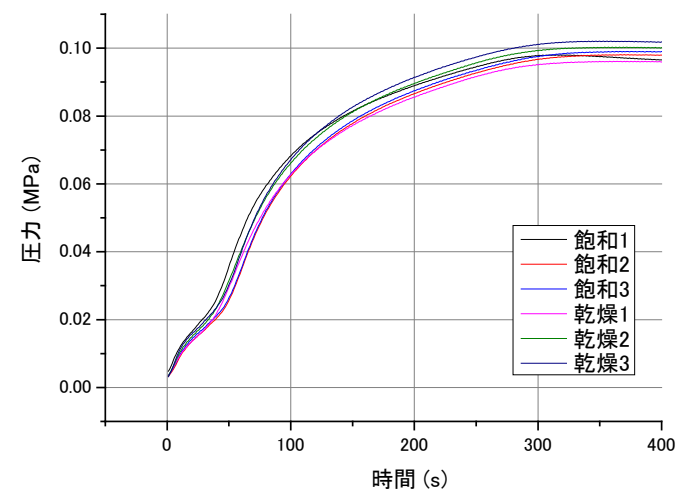


a) 注入圧力の経時変化

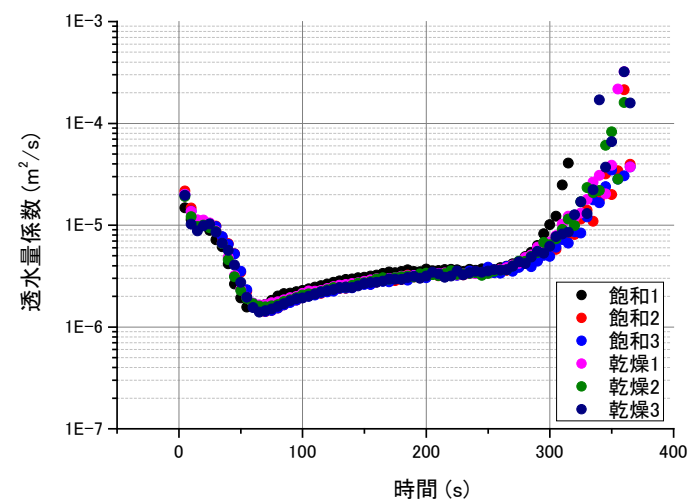


b) 透水量係数の経時変化

(1) 117 cp, 31 ml/min



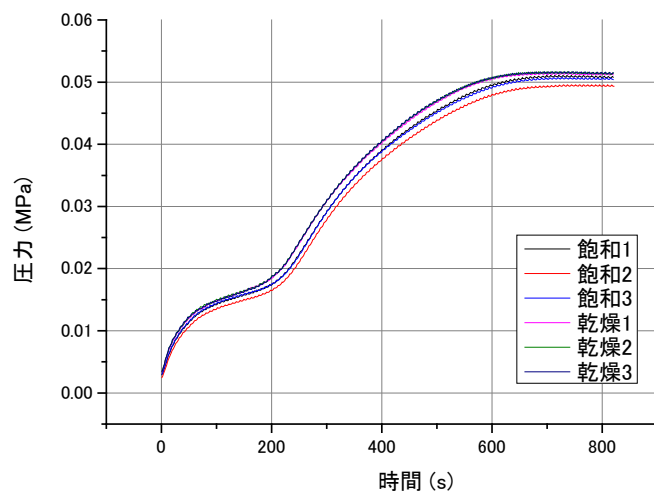
a) 注入圧力の経時変化



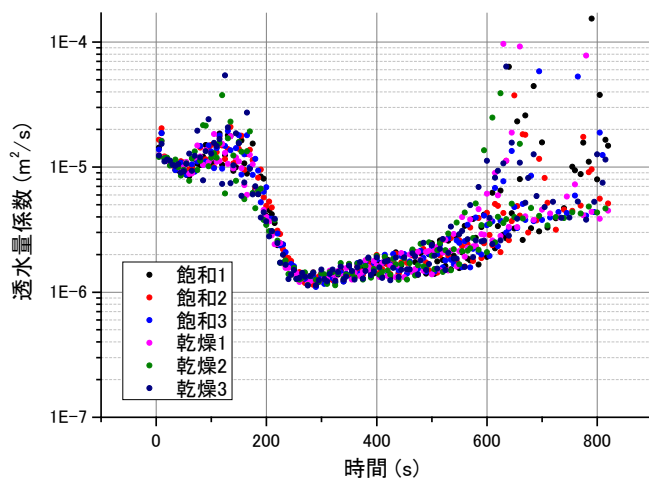
b) 透水量係数の経時変化

(2) 117 cp, 61 ml/min

図 4.3.2-13 割れ目幅が2段階の場合の試験結果 ($R < 0.2 \text{ m}$: 0.3mm , $R > 0.2 \text{ m}$: 0.15mm)

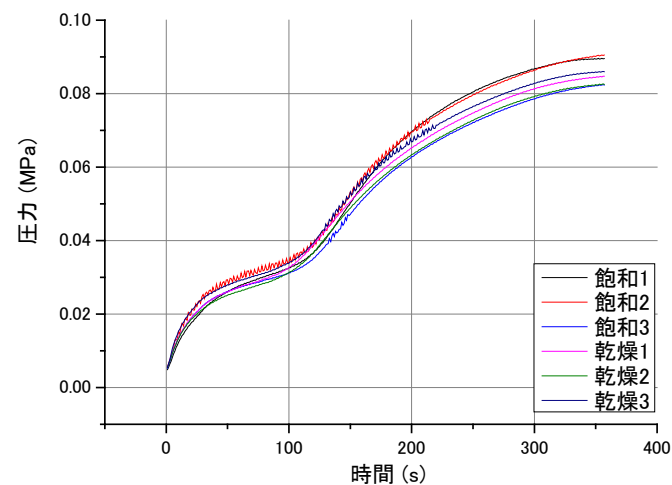


a) 注入圧力の経時変化

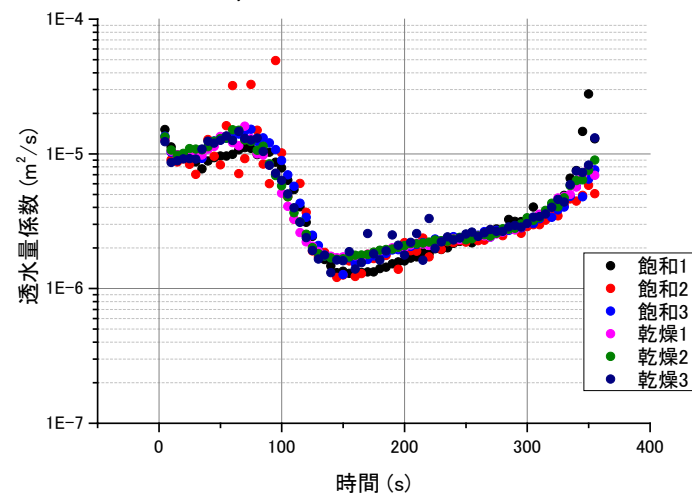


b) 透水量係数の経時変化

(1) 122 cp, 31 ml/min



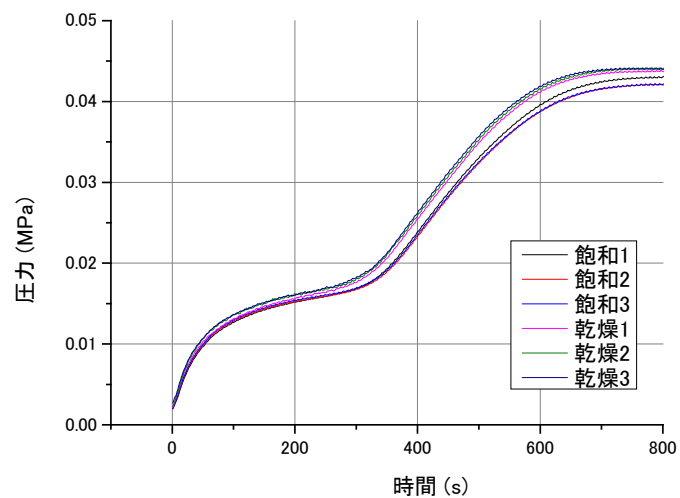
a) 注入圧力の経時変化



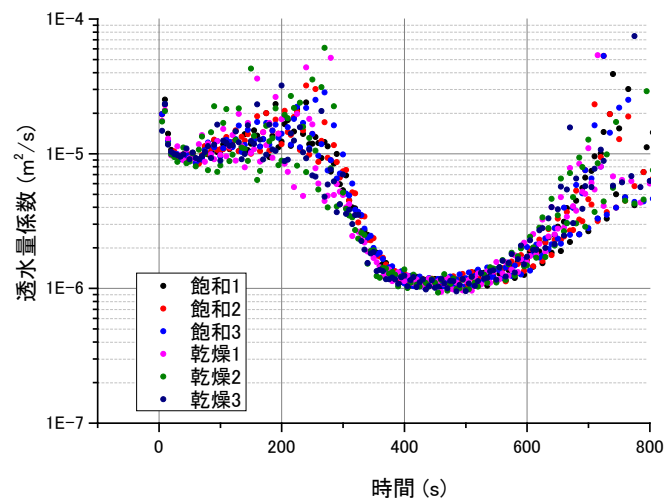
b) 透水量係数の経時変化

(2) 122 cp, 60 ml/min

図 4.3.2-14 割れ目幅が2段階の場合の試験結果 ($R < 0.3 \text{ m}$: 0.3mm , $R > 0.2 \text{ m}$: 0.15mm)

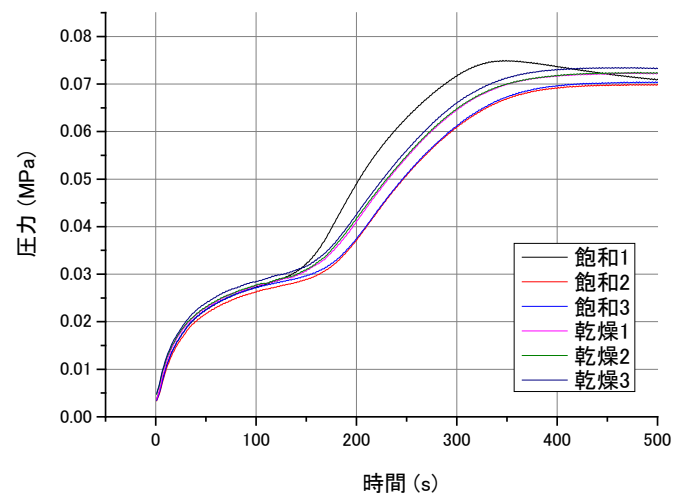


a) 注入圧力の経時変化

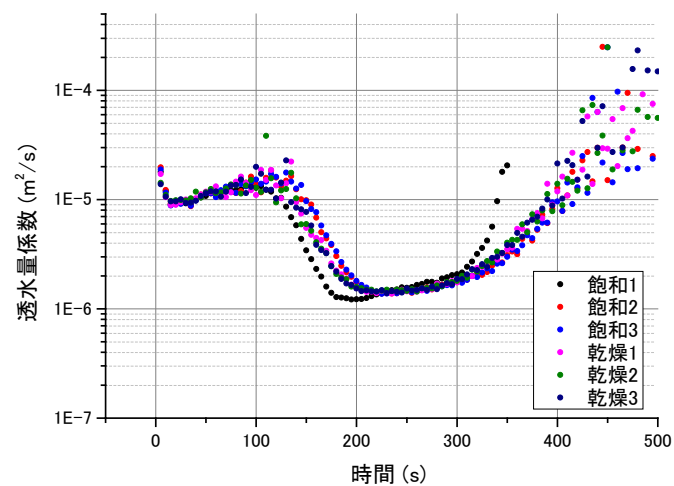


b) 透水量係数の経時変化

(1) 112 cp, 30 ml/min



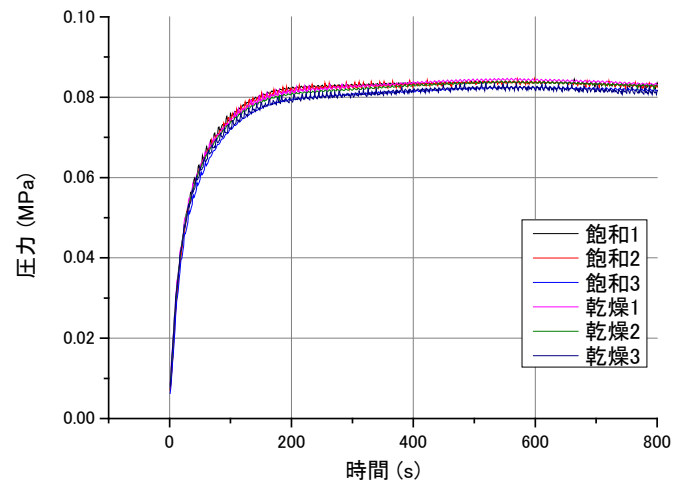
a) 注入圧力の経時変化



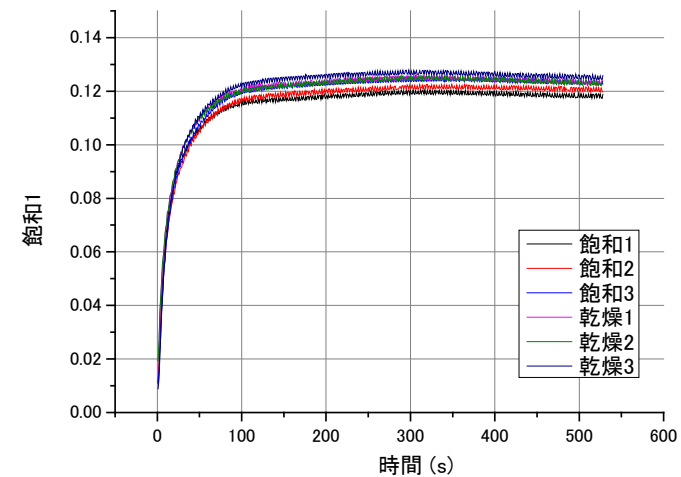
b) 透水量係数の経時変化

(2) 112 cp, 60 ml/min

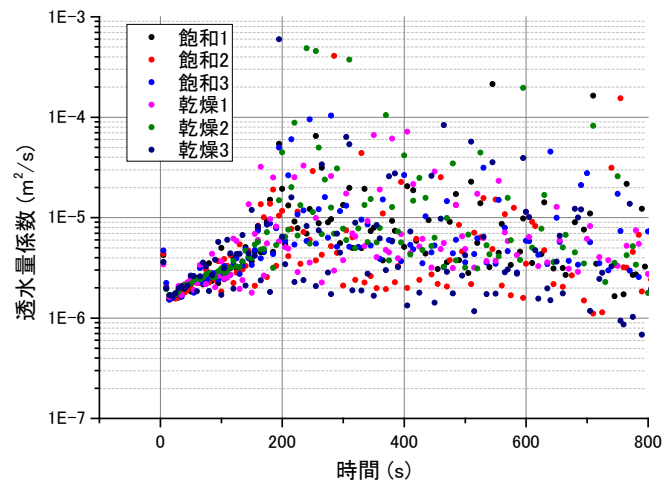
図 4.3.2-15 割れ目幅が2段階の場合の試験結果 ($R < 0.4$ m: 0.3mm, $R > 0.4$ m: 0.15mm)



a) 注入圧力の経時変化

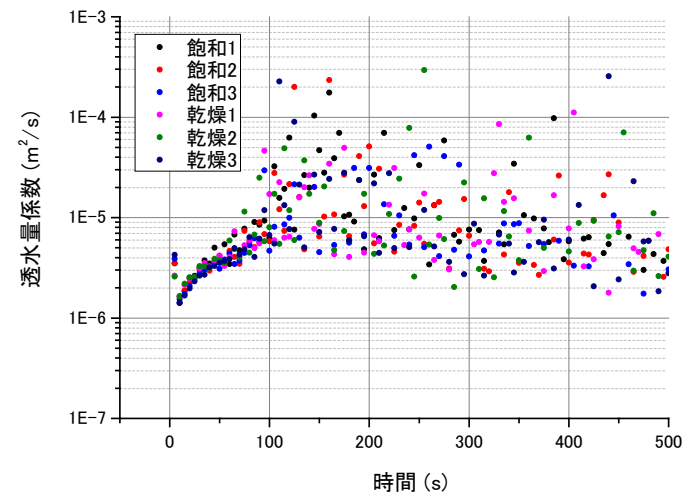


a) 注入圧力の経時変化



b) 透水量係数の経時変化

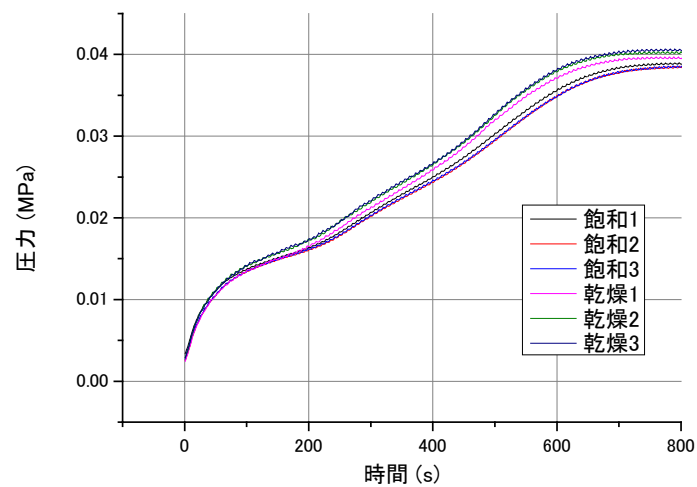
(1) 114 cp, 31 ml/min
R < 0.4 m: 0.15 mm, R > 0.4 m: 0.2mm



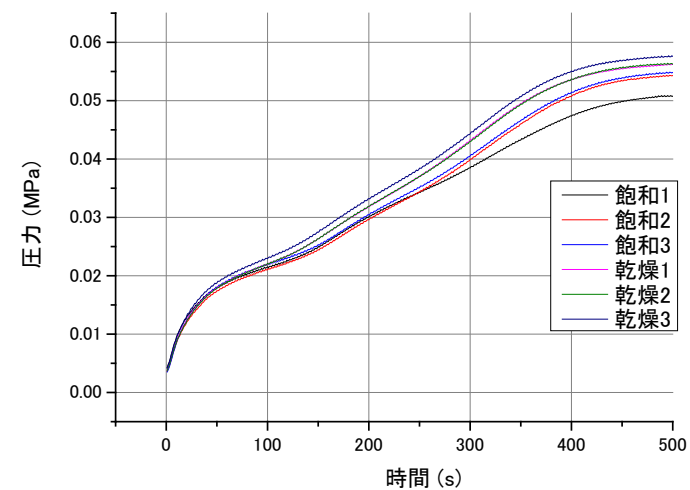
b) 透水量係数の経時変化

(2) 114 cp, 61 ml/min
R < 0.4 m: 0.15 mm, R > 0.4 m: 0.2mm

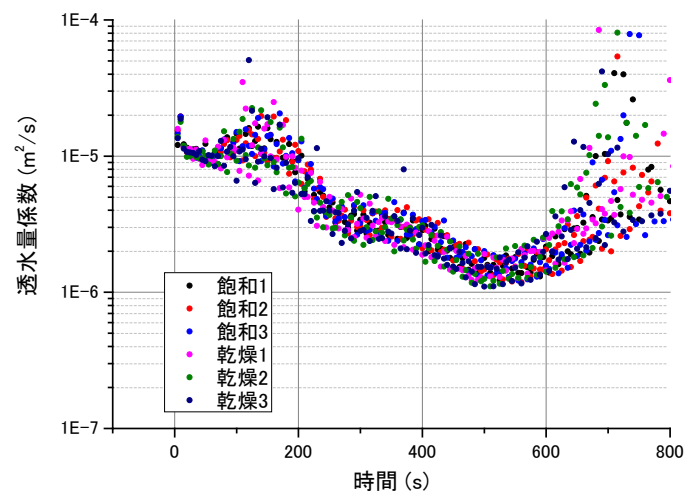
図 4.3.2-16 割れ目幅が2段階の場合の試験結果 (R < 0.4 m: 0.15 mm, R > 0.4 m: 0.2mm)



a) 注入圧力の経時変化

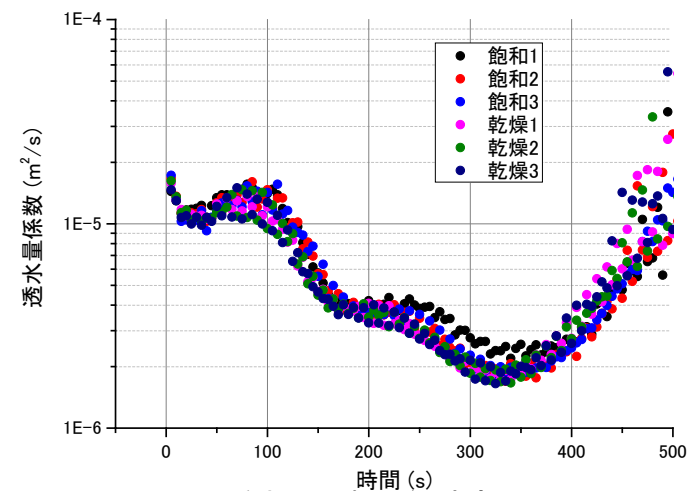


a) 注入圧力の経時変化



b) 透水量係数の経時変化

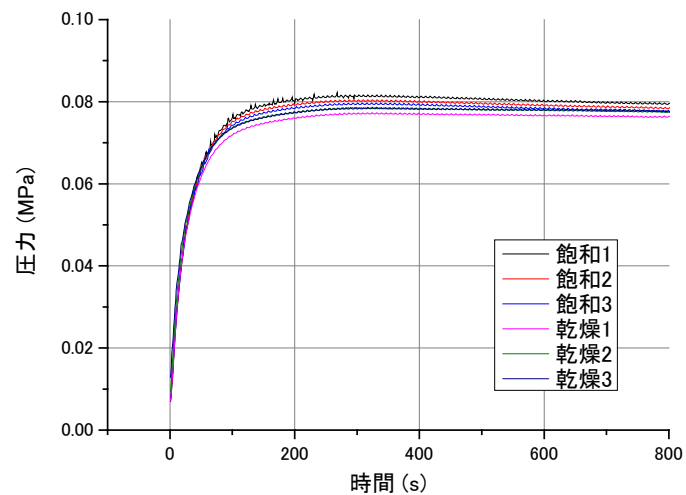
(1) 117 cp, 31 ml/min



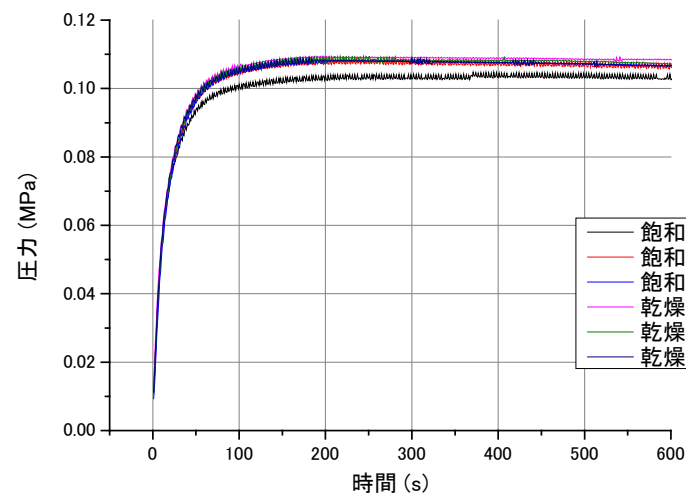
b) 透水量係数の経時変化

(2) 117 cp, 50 ml/min

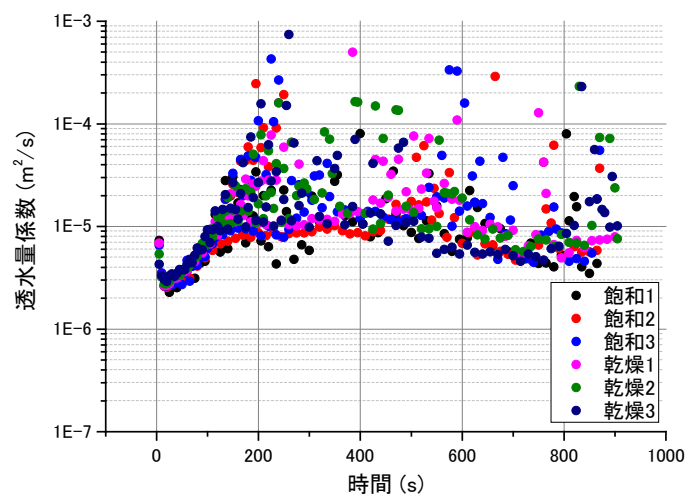
図 4.3.2-17 割れ目幅が3段階の場合の試験結果 ($R < 0.3 \text{ m}$: 0.3 mm, $R < 0.5 \text{ m}$: 0.2 mm, $R < 0.7 \text{ m}$: 0.15mm)



a) 注入圧力の経時変化

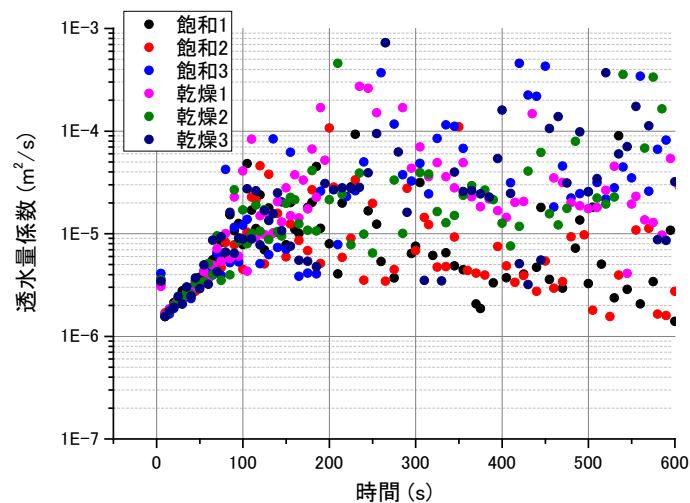


a) 注入圧力の経時変化



b) 透水量係数の経時変化

(1) 120 cp, 30 ml/min



b) 透水量係数の経時変化

(2) 120 cp, 50 ml/min

図 4.3.2-18 割れ目幅が3段階の場合の試験結果 (R < 0.3 m: 0.15mm, R < 0.5 m: 0.2 mm, R < 0.7 m: 0.3mm)

4.3.3 室内試験結果のまとめ

鋼管と軸対称割れ目に高粘性流体を注入し、高粘性流体注入により鋼管の管径や軸対称モデルの割れ目幅が評価できるかどうかについて確認した。管径が変化する場合や割れ目幅が変化する場合についても検討を実施した。

鋼管試験では、管径が一定の場合には、管内の水の有無、流量にかかわらず適切に管径が評価できることがわかった。また、管径が変化する場合には、管径が太いものから細いものに変化する場合については適切に評価できるが、細いものから太いものに変化する場合には誤差が大きいことが明らかになった。

軸対称割れ目モデルの評価について、Jacob 的な方法が高粘性流体の広がり小さい場合に誤差を含むことを示すと伴に、原位置試験において透水量係数が空間的に変化するため、時間微分に基づいて透水量係数と割れ目幅を評価する方法を導出した。

軸対称割れ目モデルでは、割れ目幅を制御するためのスペーサーを挟むネジを 10cm 間隔で配置した新しいモデルで試験を実施した。この結果、単一の割れ目幅の場合には、圧力の増加が概ね軸対称の理論式に従うようになった。また、割れ目内が水で満たされている場合とそうでない場合について実験結果に差が明確でなかった。このため割れ目内の水の影響は明確でないことが確認できた。

また、軸対称割れ目モデルを用いて割れ目幅が変化するように設定して実験を実施し、高粘性流体の注入圧力の変化から透水量係数の変化について評価できることを示した。これにより原位置で確認された圧力応答が 2 段階となる現象も透水係数場が 2 つ存在することで説明が可能であることが確認できた。

ただし、割れ目幅が変化する場合、割れ目幅が大きいものから小さいものに変化する場合には圧力増加が大きくなるため精度良く評価できるが、割れ目幅が小さいものから大きいものに変化する場合には、圧力増加が小さくなるため、評価が難しいことが示唆された。

4.4 高粘性流体注入の解析的検討

高粘性流体試験では、一次元流や二次元流（軸対称流）など比較的単純な流動場に基づいて、定流量注入時の圧力応答を検討してきたが、原位置試験においても見られたように、透水係数場が二段階に分かれている場合、透水係数が注入孔から離れるにしたがって低下している場合など、透水係数場が不均質である場合が想定される。このため、高粘性流体を定流量注入した場合の圧力応答について知見を得るために不均質な場を想定し、どのような圧力応答になるかを数値解析により検討した。

4.4.1 高粘性流体の解析理論

高粘性流体の挙動については、地下水流動と同様にダルシー則を運動方程式とし、高粘性流体の広がりについては濃度を指標とした。ダルシー則においては地下水と高粘性流体の流動を、粘性を指標として以下のように表現した。

$$V_i = -\frac{k_{ij}}{\mu} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (4.4.1-1)$$

V_i はダルシー流速の i 方向成分、 k_{ij} は透水係数テンソル、 μ は濃度の関数、 x_i は i 方向の座標、 ϕ は圧力水頭(= $P/\rho_o g$)、 P は水圧、 ρ_o は淡水の密度、 g は重力加速度、 z は位置水頭である。

連続の式には以下の式を用いる。

$$Ss \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i} V_i + Q \quad (4.4.1-2)$$

ここに、 S_s は比貯留係数、 t は時間、 Q は流入出量である。

一方で、高粘性流体の広がり物質移行現象として求めた。すなわち水は濃度 0、高粘性流体は濃度 1 のように、高粘性流体を製作する際の溶質の濃度を指標として、その広がりを溶質移行現象として解析する。

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial C}{\partial x_i} \left(V_i C + n D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (4.4.1-3)$$

ここに、 n は有効間隙率、 C は濃度、 D_{ij} は分散係数である。

式(4.4.1-2)と式(4.4.1-3)を連成して解くことにより、式(4.4.1-2)で粘性を考慮した圧力場を、式(4.4.1-3)で高粘性流体の広がりを評価することにより、時間的に変化する高粘性流体の広がりを評価することとした。

この解析は当所が開発した地下水流動・物質移行解析プログラム(FEGM/FERM)で実施した(河西ほか、1994, 1995)。

4.4.2 一次元の高透水場が存在する場合

均質な媒体内に一次元の高透水場が存在する図 4.4.2-1 のような場合について解析を実施した。均質な部分の透水係数は一定とし、高透水部について透水係数を変化させて感度解析を実施した。注入孔と観測孔とは高透水部との位置関係によって圧力応答が変化するため、注入箇所を変化させてその影響を検討した。これらの解析条件を表 4.4.2-1 と表 4.4.2-2 に示す。

表 4.4.2-1 高粘性流体の注入条件

注入流量	注入濃度	粘性	注入地点
1.667E-7 m ³ /s (100ml/min)	1 (100cp 相当)	$\mu = 4.4 \exp\left(\frac{C}{0.32}\right) - 3.4$	(1) (0, 0) (2) (0, 1) (3) (0, 2)

表 4.4.2-2 解析モデルの諸物性

分散長	高透水部	母岩部
透水量係数	母岩部の透水係数 x10, 100, 1000, 10000	5.7×10^{-6} m/s
幅	0.01 m	2.6×10^{-4} m/s
分散長	縦分散長 0.1 m、横分散長 0.01 m	
間隙率	100%	

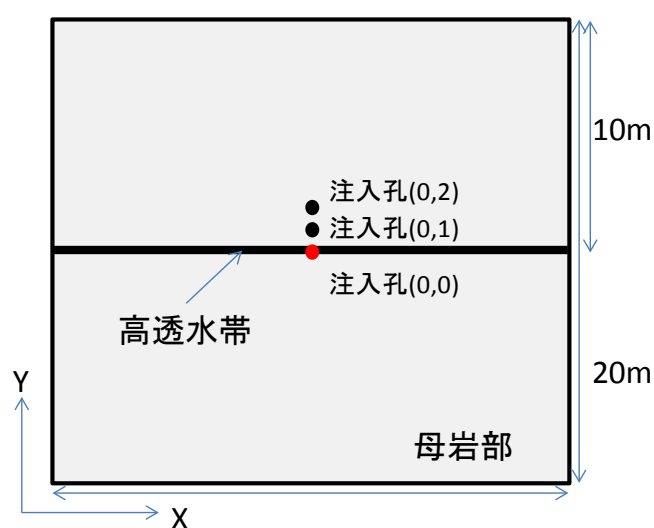


図 4.4.2-1 解析領域および解析条件図

1) 高透水路から注入した場合

中央から注入した場合、高透水路の透水係数が均質媒体部分と同じ(倍率×1)であれば、軸対称的な流動場となる。一方で高透水路の透水係数を増加すると、高透水路の透水係数の増加に伴って一次元的な流動が卓越することとなる。このため、高透水路の透水係数が高ければ高いほど一次元的な圧力応答に近づく。

この高透水路の透水係数を大きくした場合の注入圧力を図 4. 4. 2-2 に示す。高透水路から注入しているため、透水係数の増加に伴って注入圧力が低下する。さらに、時間軸を対数軸としたものを図 4. 4. 2-3 に示す。時間軸を対数軸とすると、2 次元的な流動の場合には、 $P\text{-}\log t$ 曲線は直線になる。このため、二次元流である均質の場合(倍率×1)、直線的になる。一方で、高透水路の透水係数が大きく、初期に一次元的な流動が卓越するほど、時間の増加と共に 2 次元的な流動に傾きが近づいてくる傾向がある。これは一次元的な流動から周辺に広がる 2 次元的な流動に近づいてくるためと考えられる。

観測孔での圧力応答は、高透水路から注入した場合には、上下対称かつ左右対称となるため、(0, 1)，(2, 0)の 2 箇所と比較した。これらの観測孔での圧力を図 4. 4. 2-4～図 4. 4. 2-5 に示す。

図 4. 4. 2-4 に示す観測孔(0, 1)では、均質媒体の場合には軸対称的な流動となるが、高透水路の透水係数の増加に伴い、傾きが緩やかになり直線的になっているのがわかる。これは、高透水路の透水係数が大きくなるほど、高透水路で高粘性流体が直線的に広がり、その後、直線から一次元的に均質媒体に供給されるため、観測孔でも一次元的な流動形態になると考えられる。ちなみに最も圧力の増加が大きいのは均質の場合である。一方で図 4. 4. 2-5 に示す観測孔(0, 2)は高透水路内に位置するため、高粘性流体の到達時間の違いと流れの次元の違いで複雑な応答となっている。

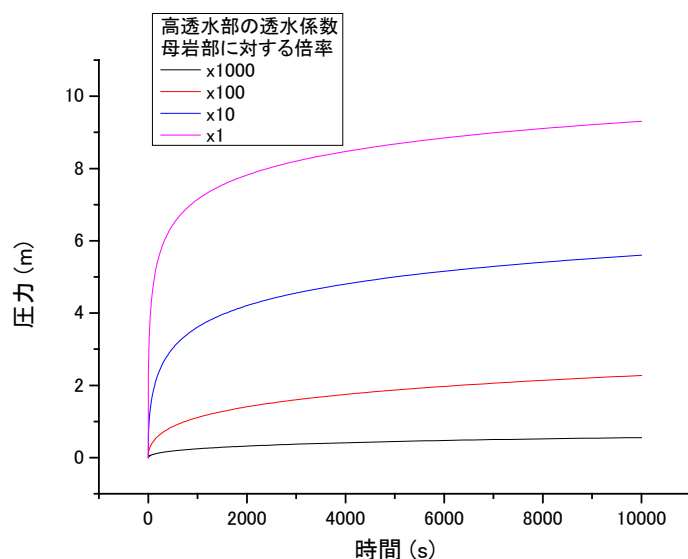


図 4. 4. 2-2 注入圧力の経時変化

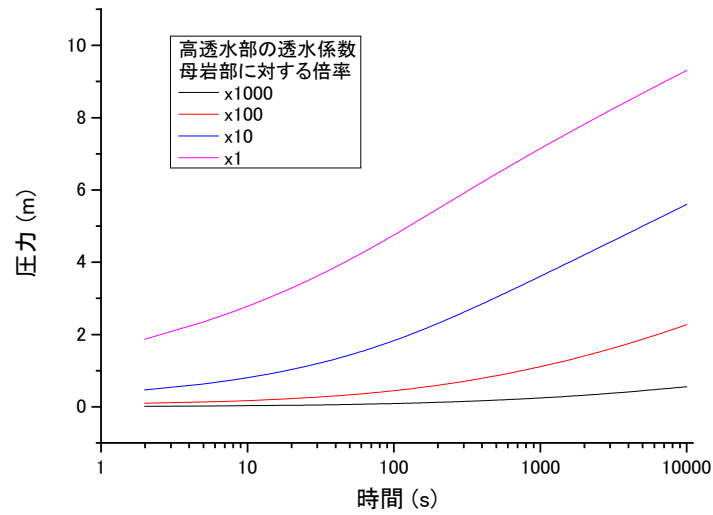


図 4.4.2-3 注入圧力の対数時間に対する変化

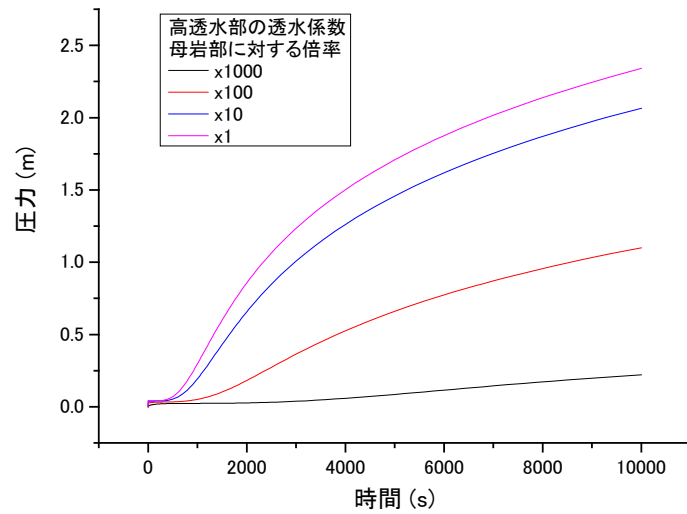


図 4.4.2-4 観測孔 (0, 1) での注入圧力の経時変化

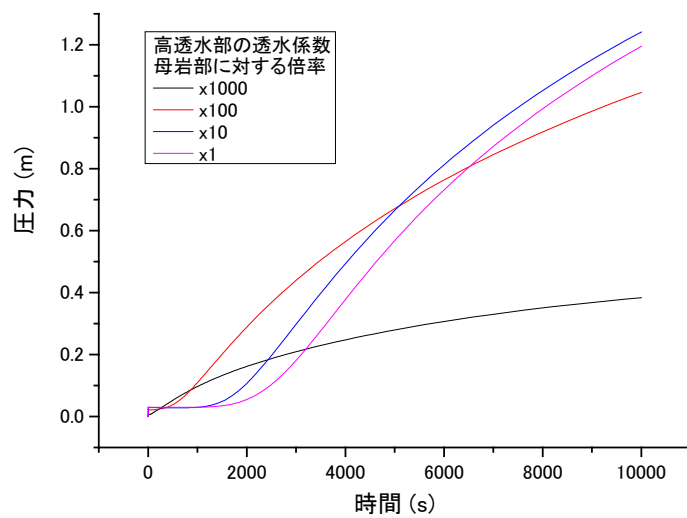


図 4.4.2-5 観測孔 (2, 0) での注入圧力の経時変化

2) 低透水部から注入した場合

図 4. 4. 2-1 に示すように高透水部が X 軸上に位置する場合に、高透水部から少し離れた (0, 1), (0, 2) から注入した場合の注入孔での注入圧力の経時変化を図 4. 4. 2-6~7 に示す。注入圧力の経時変化は、均質媒体から注入した場合とほぼ同じであることがわかる。高透水帯の透水係数が高い場合、時間と共に注入圧力の増加が小さくなる。これは、高粘性流体が高透水帯へ流入することにより、それ以上の流動抵抗を発生しなくなるためと考えられる。ただし、その影響は非常に小さく、(0, 2) からの注入からもわかるように注入孔が高透水帯から遠いほど影響は小さい。このため、高透水帯が近くにあっても注入孔での圧力変化からその存在を把握するのは難しいと考えられる。

一方で観測孔では、高透水帯が周辺にある場合の圧力応答の変化は顕著であった。ここでは、(0, 1) から注入した場合の周辺の観測孔 (-1, 1) での圧力応答を図 4. 4. 2-8 に示す。高透水帯の透水係数によって圧力の応答が倍程度変化することがわかる。同様に、観測孔 (0, 2) での圧力応答を図 4. 4. 2-9 に示す。(0, 2) は高透水帯の反対側であるが、高透水帯によってこの方向への流量が変化するため、高透水帯の透水係数によって圧力応答に変化が生じている。圧力応答の変化は注入孔から離れても顕著であり、観測孔 (-2, 1) と観測孔 (0, 3) の圧力を図 4. 4. 2-10 と図 4. 4. 2-11 に示す。両観測孔とも注入孔からの距離は 2m であるが、高透水帯の透水係数によって圧力応答に顕著な差が出ている。最後に高透水帯を挟んで注入孔の反対側にある観測孔 (0, -1) での圧力応答を図 4. 4. 2-12 に示す。高透水帯の透水係数が大きいほど圧力応答が小さくなり、高透水帯の透水係数が非常に大きい場合には高粘性流体が到達しないため、圧力が上昇していない。これらのことから、均質媒体で評価を行い、その差から高透水帯の存在や不均質媒体の存在について検討するのが有効であると考えられる。

このように、高透水帯などの存在は、注入孔よりも観測孔に顕著に表れ、しかも観測孔より遠く、高透水帯によって流動が変化する地点で大きくなることが明らかとなった。

次に、(0, 2) から注入した場合の観測孔 (0, 1) と (0, 3) の結果とを図 4. 4. 2-13~14 に示す。この場合、観測孔 (0, 1) は注入孔と高透水帯の間、観測孔 (0, 3) は高透水帯からは離れた地点になる。(0, 1) では高透水帯の透水係数によって影響が大きい。特に透水係数が大きいほど圧力上昇が小さくなる。これは高透水帯に高粘性流体の広がり制限され、境界となるような効果があるためと考えられる。(0, 3) では (0, 1) のように高透水帯によって高粘性流体の広がりの影響が小さい。これらのことから、注入孔だけでなく、観測孔も含めて評価することにより、高透水帯や不均質媒体の評価に有効であることがわかる。

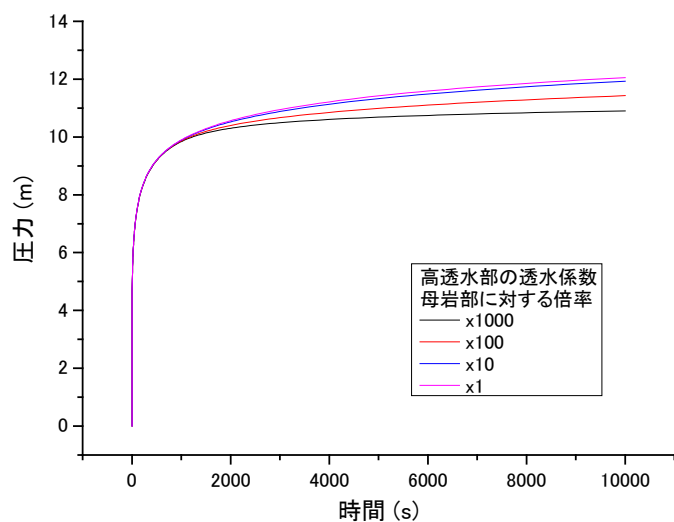


図 4. 4. 2-6 注入 (0, 1) における注入圧力の経時変化

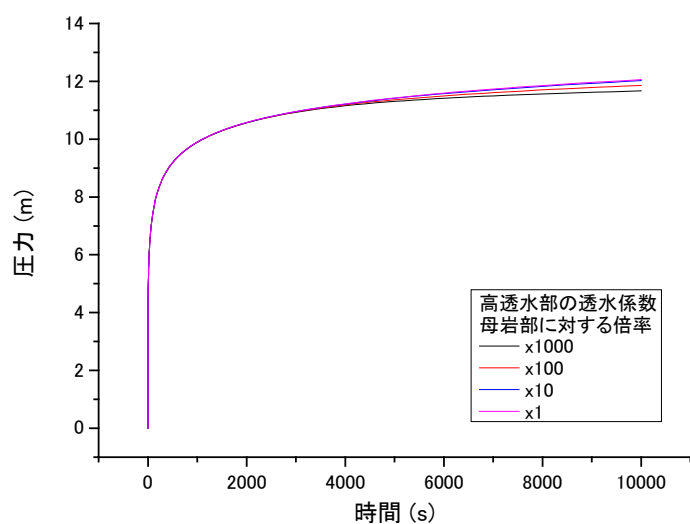


図 4. 4. 2-7 注入 (0, 2) における注入圧力の経時変化

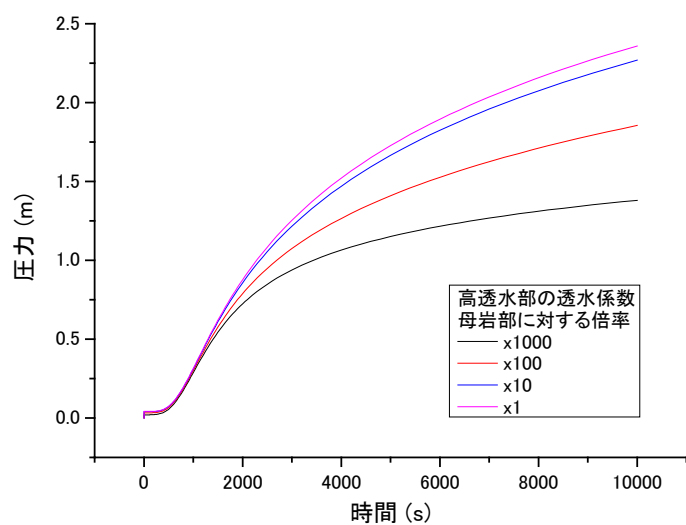


図 4. 4. 2-8 注入 (0, 1) における観測孔 (-1, 1) の圧力の経時変化

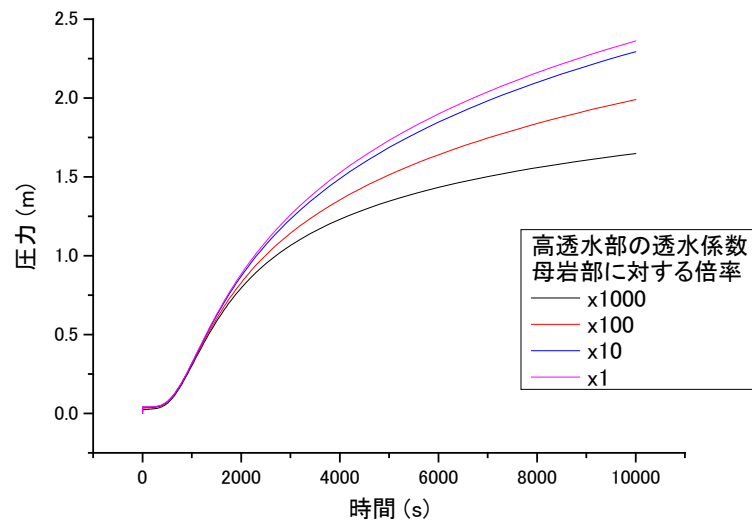


図 4. 4. 2-9 注入(0, 1)における観測孔(0, 2)の圧力の経時変化

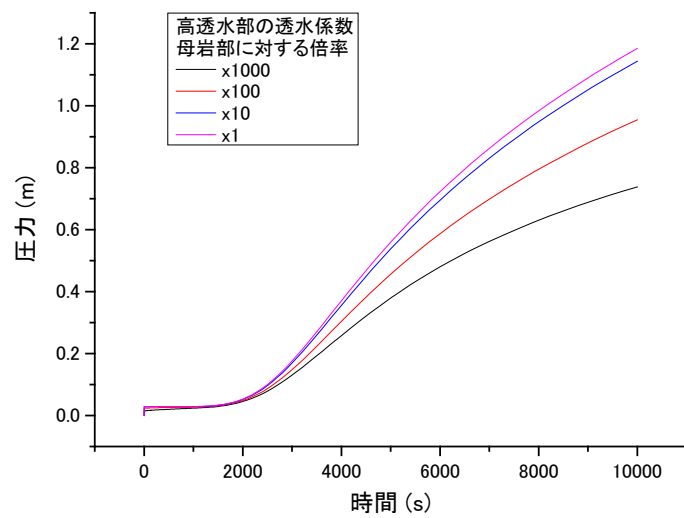


図 4. 4. 2-10 注入(0, 1)における観測孔(-2, 1)の圧力の経時変化

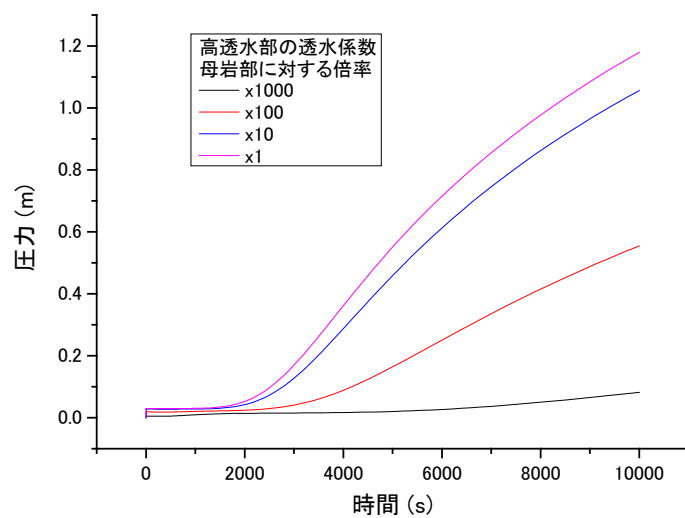


図 4. 4. 2-11 注入(0, 1)における観測孔(0, 3)の圧力の経時変化

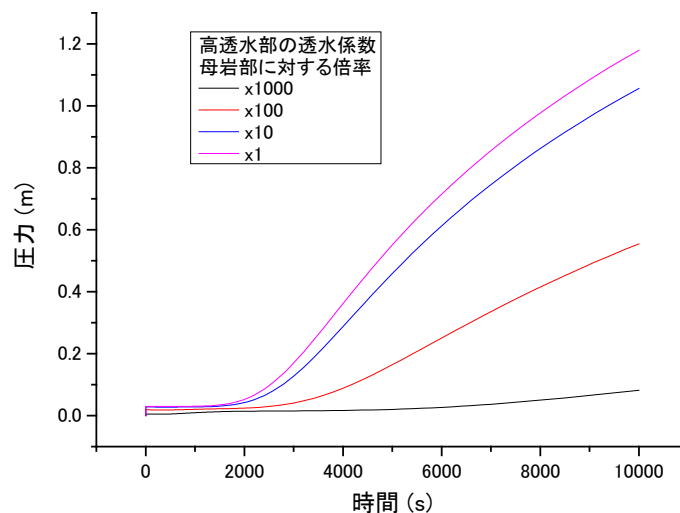


図 4. 4. 2-12 注入(0, 1)における観測孔(0, -1)の圧力の経時変化

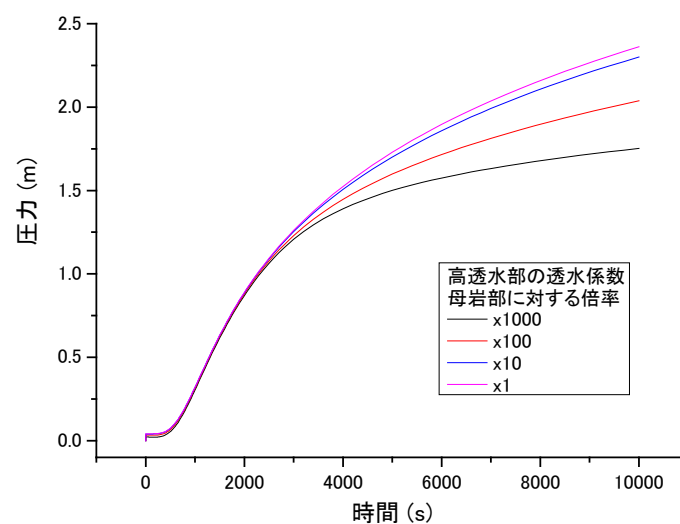


図 4. 4. 2-13 注入(0, 2)における観測孔(0, 1)の圧力の経時変化

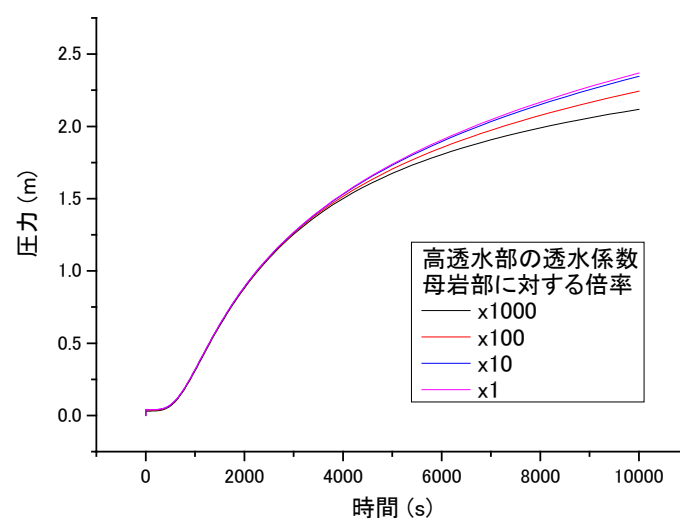


図 4. 4. 2-14 注入(0, 2)における観測孔(0, 3)の圧力の経時変化

4.4.3 円形の高透水場が存在する場合

均質な媒体内に円形の高透水場が存在する図 4.4.3-1 のような場合について解析を実施した。均質な部分の透水係数は一定とし、高透水路について透水係数を変化させて感度解析を実施した。注入孔と観測孔とは高透水路との位置関係によって圧力応答が変化するため、いくつかの代表的な地点について検討した。これらの解析条件を表 4.4.2-1～2 に示した通りである。

(1) 高透水路から注入した場合

中央から注入し、高透水路の透水係数を変化させた場合の注入圧力を図 4.4.3-2 に示す。高透水路の透水係数が均質媒体部分と同じであれば、軸対称的な流動場となる。一方で高透水路の透水係数が大きくなると、高透水路を広がる際の圧力上昇が小さくなる。注入圧力と時間の対数の関係を図 4.4.3-3 に示す。均質媒体では軸対称流となるため、4.4.2 の 2 次元模型で示したように線形になる。高透水路の透水係数が大きい場合には、近似線の勾配が 2 段階で変化する形態となる。これは 2 次元模型で割れ目幅の異なる場合の応答と同じであり、透水係数が高透水路から均質媒体部へと変化するためにこのような応答になる。このような応答の場合には、高透水路の広がりについて有益なデータが得られると考えられる。一方で、周辺孔での圧力応答を図 4.4.3-4～5 に示す。周辺孔での圧力応答は高透水路の透水係数にかかわらず同じになっている。これは、観測地点より先を高粘性流体が流れるために必要な圧力のためであり、均質媒体部での透水係数は全て同じためである。

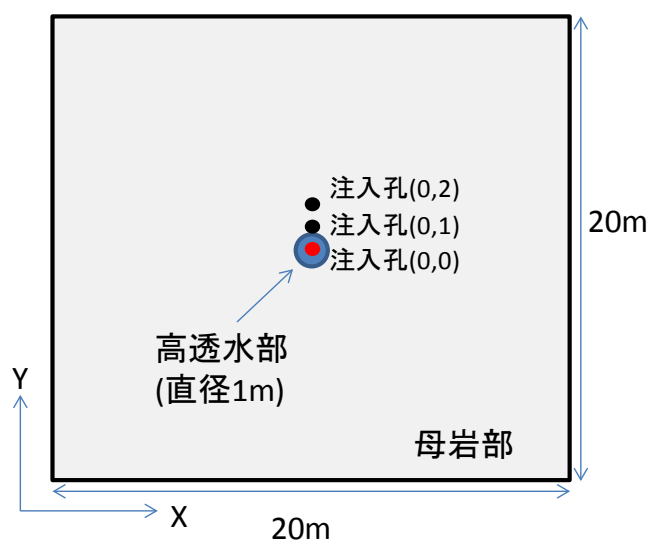


図 4.4.3-1 円形の高透水場が存在する場合の解析条件図

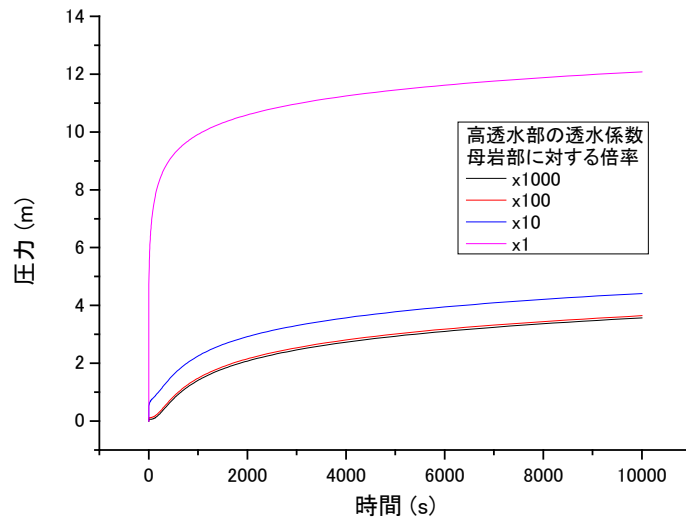


図 4. 4. 3-2 注入圧力の経時変化

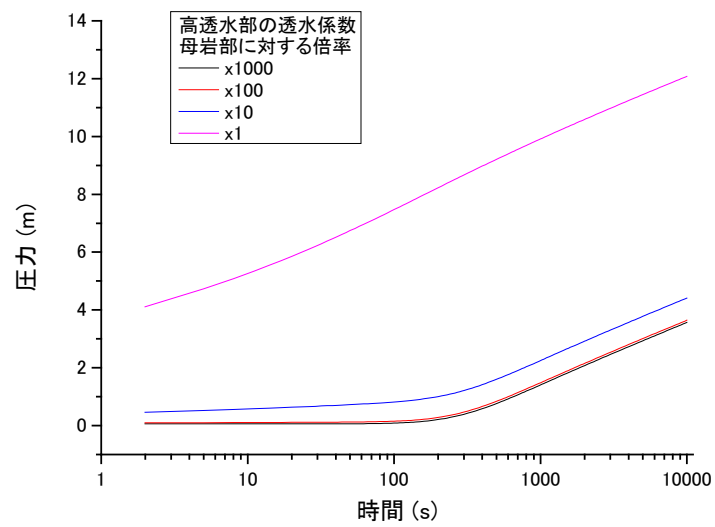


図 4. 4. 3-3 注入圧力の対数時間に対する変化

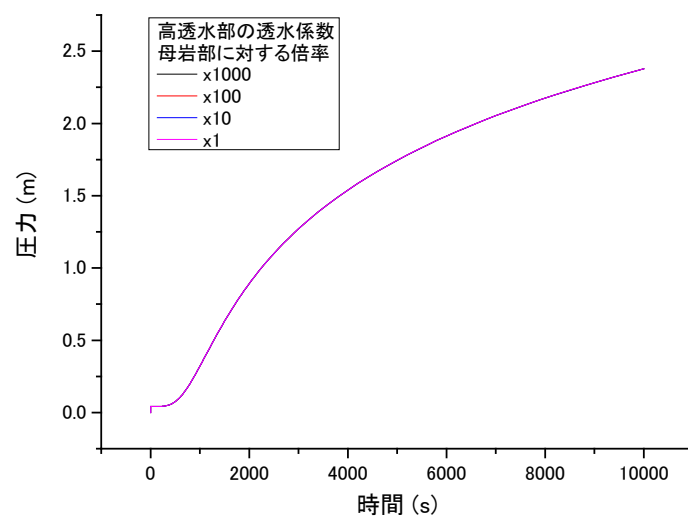


図 4. 4. 3-4 周辺孔(0, 1)での圧力応答

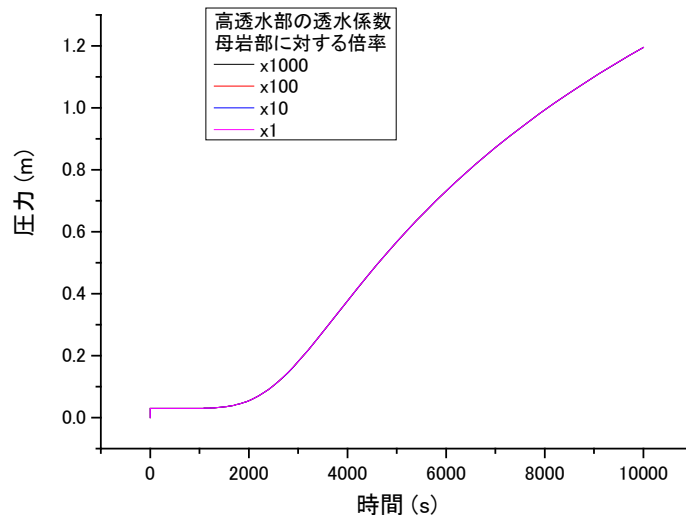


図 4. 4. 3-5 周辺孔(0, 2)での圧力応答

(2) 低透水部から注入した場合

(0, 1)から注入した場合、(0, 2)から注入した場合の注入孔での圧力変化を図 4. 4. 3-6～7 に示す。注入孔(0, 1)の場合、高透水帯が注入孔での圧力に少し影響し、高透水帯の透水係数が大きいほど圧力上昇が小さくなっているのがわかる。ただし、注入孔(0, 2)の場合、高透水帯が注入孔での圧力にほとんど影響しない。このように一部に高透水な部分があっても注入孔からでは識別が難しいことがわかる。これは前項の直線上に高透水帯がある場合も同じであり、注入孔での圧力変化から離れた地点にある高透水帯の識別は難しい。一方で、観測孔では図 4. 4. 3-8～9 に示すように(0, 1)から注入した場合の(0, 0)と(0, 2)を比較すると、(0, 2)の方に高透水帯の透水係数による違いが出ているものの、(0, 0)では有意な違いが出ていない。これは、図 4. 4. 3-10 に示すように、高透水帯には高粘性流体が一気に流入して高粘性流体で満たされ、その後は、高透水帯を媒体として高粘性流体が周辺に広がるため、圧力上昇は高透水帯でも周辺と同じになるようである。

次に、図 4. 4. 3-11～12 に(0, 2)から注入した場合の(0, 1)と(0, 3)を比較する。この場合、両者は注入孔から同距離に離れているものの、(0, 1)は高透水帯に近いので、高透水帯の透水係数が大きいほど圧力上昇がやや小さくなる。これは、高透水帯に流入することにより流動抵抗が低下するためと考えられる。

このように高透水帯が限定的な場合には、その存在を確認するのが難しい。

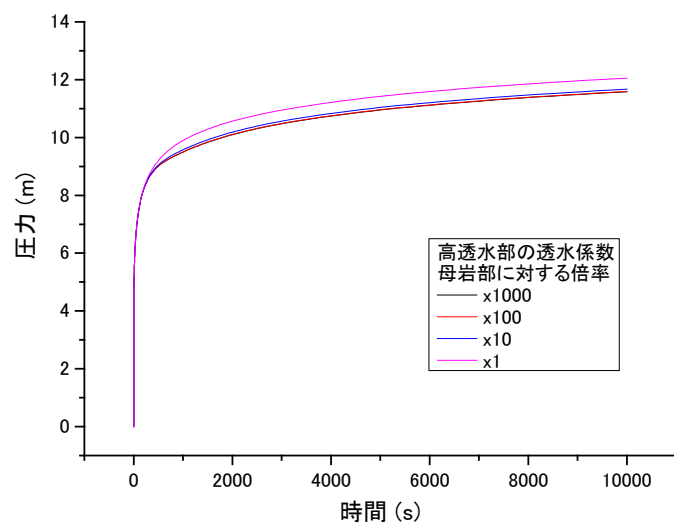


図 4. 4. 3-6 注入孔(0, 1)での圧力応答

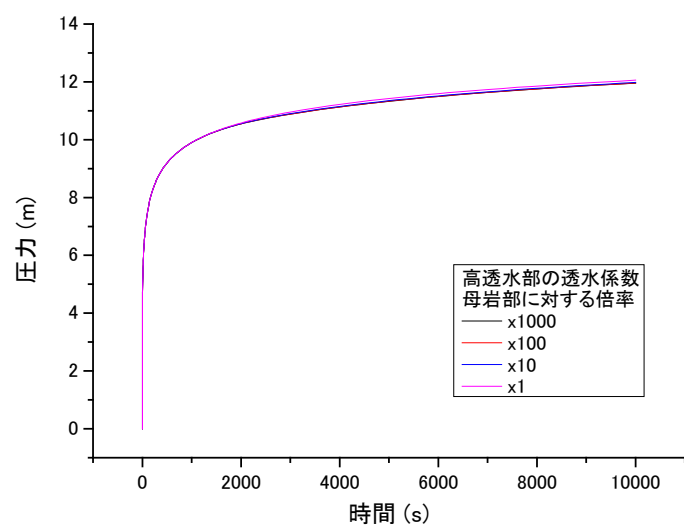


図 4. 4. 3-7 注入孔(0, 2)での圧力応答

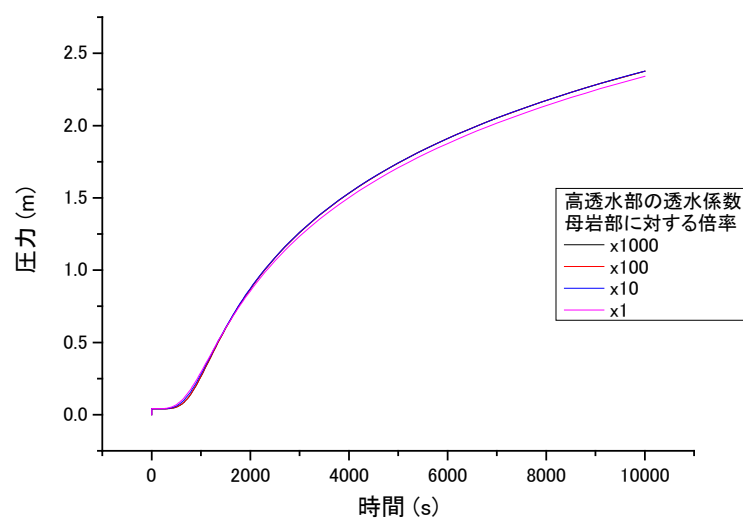


図 4. 4. 3-8 注入孔(0, 1)での(0, 0)の圧力応答

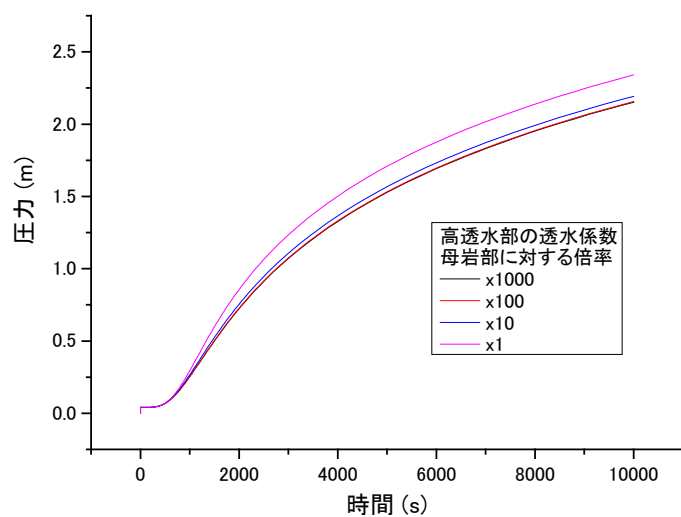


図 4. 4. 3-9 注入孔(0, 1)での(0, 2)の圧力応答

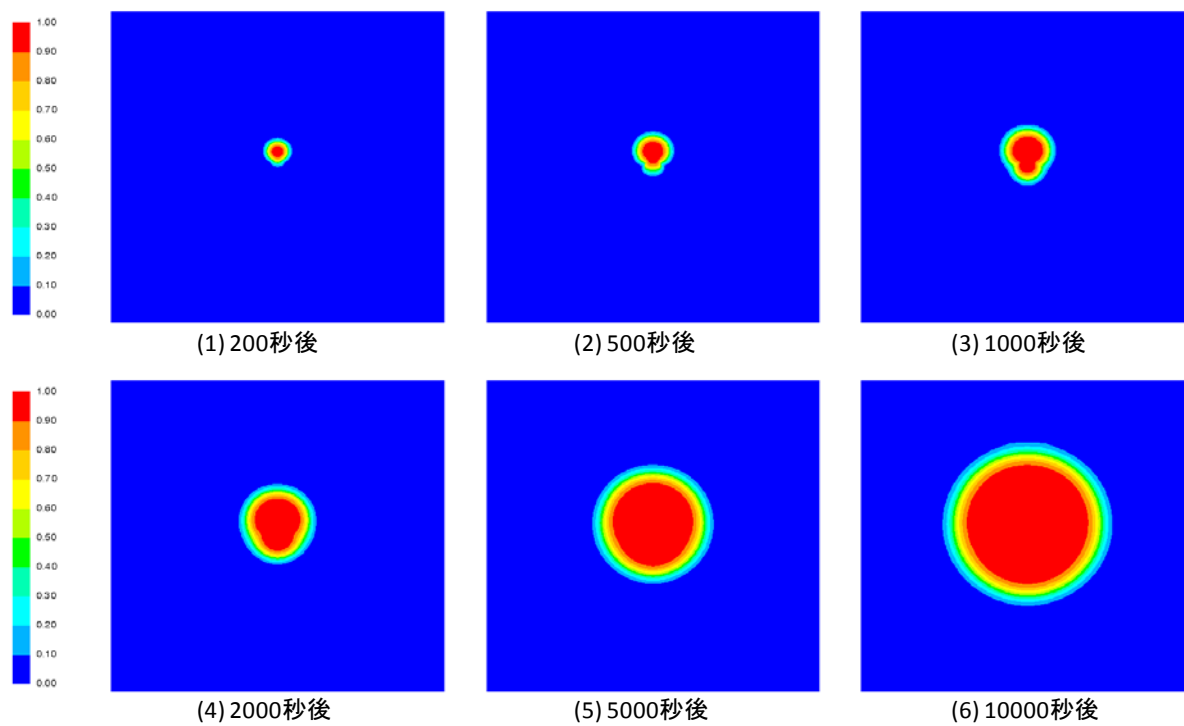


図 4. 4. 3-10 注入孔(0, 1)での高粘性流体の広がり

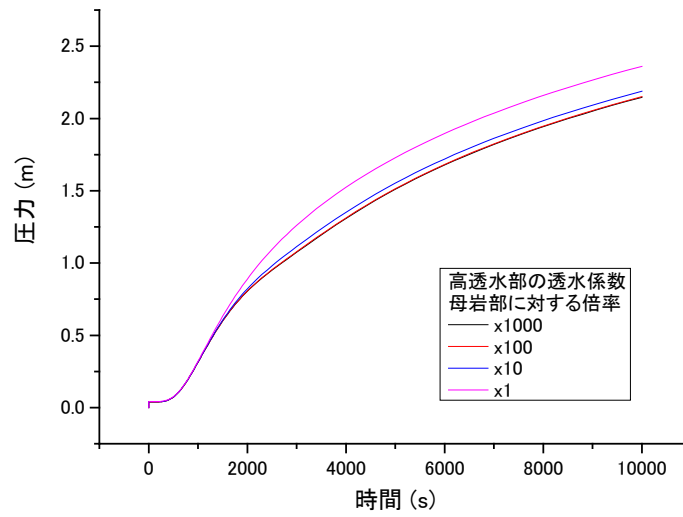


図 4. 4. 3-11 注入孔 (0, 2) での (0, 1) の圧力応答

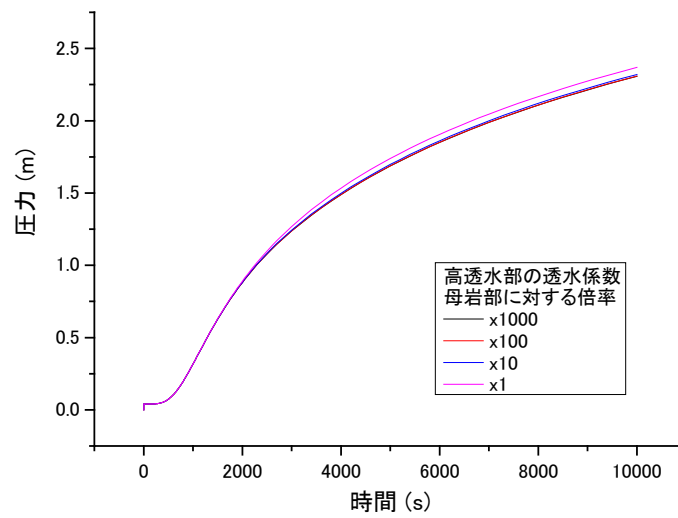


図 4. 4. 3-12 注入孔 (0, 2) での (0, 3) の圧力応答

4.4.4 乱数で発生させた場合

透水係数場を乱数で発生させた場合について解析を実施した。透水係数場は、相関長を 0.2m、透水量係数(T)の対数紙上での平均を-4.8、標準偏差を 1 として発生させた($T=10^{\mu \pm \sigma}$:ここに μ は対数での平均、 σ は対数での標準偏差)。発生させた透水係数場を図 4.4.4-1 に示す。この透水係数場に対して表 4.4.2-1 と表 4.4.2-2 の条件で高粘性流体を注入した。なお割れ目幅は、 2.64×10^{-4} m とした。この高粘性流体の広がり随着时间的な変化を図 4.4.4-2 に示す。時間的に X 方向(横方向)に広がり Y 方向(縦方向)への広がりはいさなのがある。注入圧力の経時変化を図 4.4.4-3 に、各観測孔での圧力変化を図 4.4.4-4 に示す。圧力の変化は注入開始直後に急激に増加した後、変化が小さくなっている。これは高粘性流体の広がりに伴い、透水量係数の高いところに選択的に進むことにより、注入圧力が増加しなくなったためと考えられる。この結果は図 4.4.4-2 に示した最終的な濃度分布が選択的な広がりを見せていることから明らかである。ただし、このような選択的な広がり、注入圧力の増加が有意でないため、一次元流としては評価が困難である。

観測孔での圧力変化は、高粘性流体の広がりが大きい右方向については圧力の立ち上がり早く、増加が顕著であり、高粘性流体が比較的速く到達していることを伺わせる。圧力変化は対数的になっており、選択的に一次元的な広がりがあっても二次元的な広がりが支配的と考えられる。

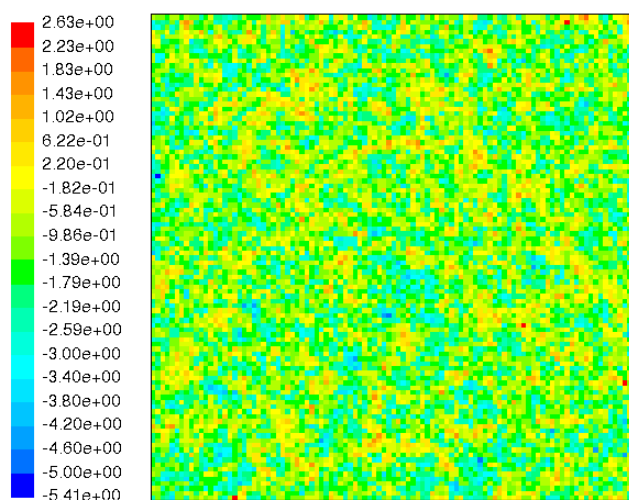


図 4.4.4-1 確率論的に発生させた透水係数場

(相関長 0.2m、対数平均-4.8、対数標準偏差 1 : $T=10^{-4.8 \pm 1}$ m²/s)

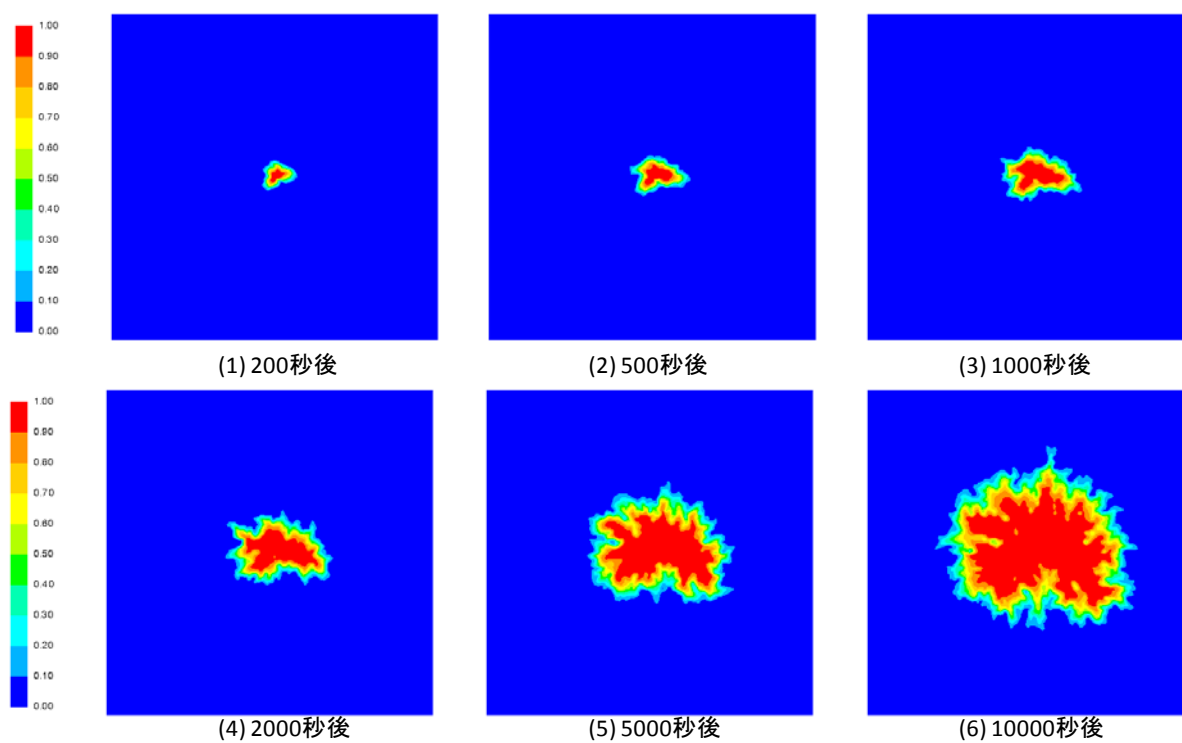


図 4. 4. 4-2 高粘性流体の広がり の時間変化

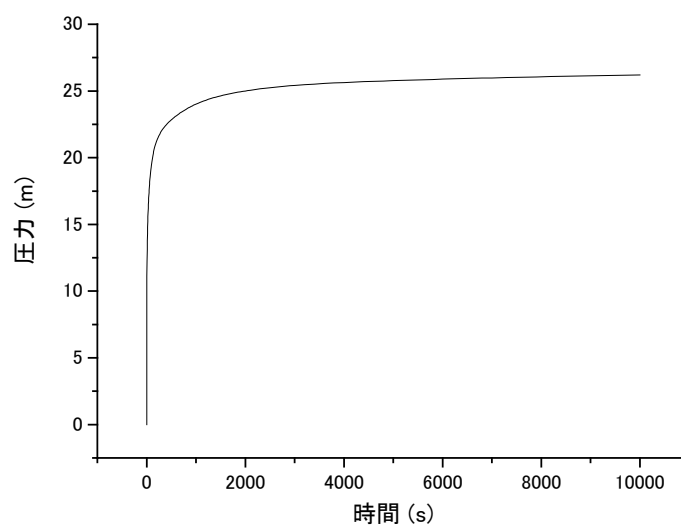


図 4. 4. 4-3 注入孔 (0, 0) での圧力の時間変化

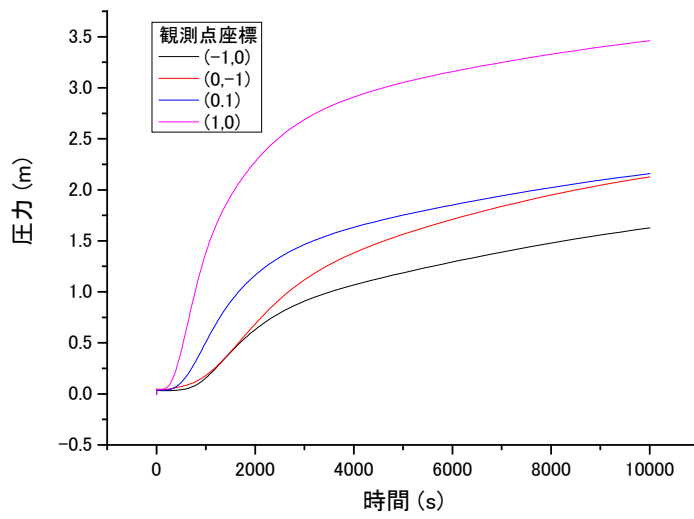


図 4. 4. 4-4 注入孔から 1m 離れた地点での圧力の時間変化

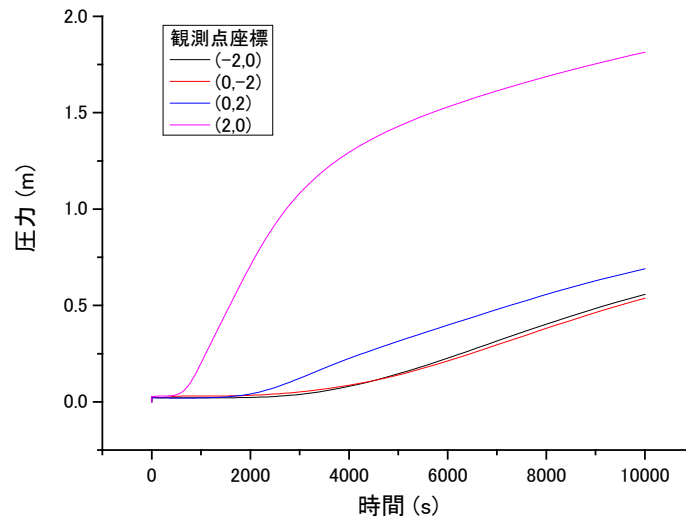


図 4. 4. 4-5 注入孔から 2m 離れた地点での圧力の時間変化

4.4.5 高粘性流体の広がり解析的な検討のまとめ

高透水場が存在する場合や不均質な場における高粘性流体注入時の圧力応答について数値解析により検討した。この結果、均質媒体の圧力応答と比較することで高透水帯が存在を確認できる可能性があることが示唆された。圧力応答は高透水帯内から注入した場合が変化が最も大きく現れるため、高透水帯内から注入した場合が最も効果的に高透水帯とそれ以外の部分の透水性の違いを評価できると考えられる。高透水帯外から注入した場合、高透水帯が存在しても、注入孔からの圧力応答ではその影響を把握することが難しいことが示唆された。一方で観測孔では、高透水帯の存在によって、応答の変化が大きくなる場合があることから、均質媒体の圧力応答と比較することで高透水帯の存在を把握できる可能性があることが示唆された。ただし、観測孔において高透水場を満たした後に高粘性流体が到達した場合には、観測孔での圧力応答はほとんど変わらない。

場が不均質な場合には、高粘性流体の広がりも不均一となるが、高粘性流体は流れやすい部分を選択的に流れるため、注入圧力から透水係数場を推定することは難しいことが示唆された。ただし、観測孔での圧力応答から高透水場の広がりなどが推定できることからこれらを組み合わせた評価が必要であると考えられる。

このような解析的な検討は、不均質は透水係数場を把握するうえで有効であると考えられた。今後、実際のサイトでの注入孔での圧力応答や周辺孔での圧力応答を考慮して、原位置での透水係数場の推定を実施する予定である。

4.5 原位置試験の評価

昨年度、一昨年度とスイス Nagra の Grimsel Test において原位置高粘性流体注入試験を実施した。この結果、14m 地点ではボーリング孔周辺に高透水場、その外側に低透水場の 2 つの透水係数場の存在が推定された。25m 地点ではボーリング孔から離れるにともない透水係数が低下する透水係数場が推定された。軸対称割れ目モデルでの試験結果で示したように、透水量係数の時間的な変化を評価できる方法を提案したため、この方法を用いてこれらの試験結果の再評価を実施することとした。

4.5.1 14m 地点での試験結果

14m 地点での高粘性流体の注入孔と観測孔の配置を図 4.5.1-1 に示す。この断面は各ボーリング孔で 14m 地点の割れ目が確認された深度に基づいて割れ目面を推定し、各ボーリング孔間の距離を推定したものである。図には単孔式透水試験から求めた透水量係数もあわせて示した。

高粘性流体の注入は、中心の BK85.008 孔から実施した。数回程度試験を実施したがここでは、高粘性流体の粘性が 100cp、注入流量 300ml/min で注入した場合の試験結果について述べる。注入孔および観測孔での圧力応答を図 4.5.1-2 に示す。図から注入孔では 2 段階に分かれて圧力が上昇しており、2 段階目以降の圧力上昇が観測孔 C-FRS08.002 で注入孔とほぼ同じたため、BK85.008 孔と C-FRS08.002 の間に高透水帯が存在するのではないかと推定された。注入圧力の経時変化を Jacob 的な方法で整理すると図 4.5.1-3 に示すように、注入開始後 420s で近似曲線の傾きが変化するため、透水量係数が変化したものと考えられた。このため、注入孔周辺に高透水帯、その外側に低透水帯がある図 4.5.1-4 のようなモデルが想定された。この注入孔での圧力応答について、時間微分に基づく方法で透水量係数を再評価した。時間微分に基づく方法で透水量係数の変化を評価した結果を図 4.5.1-5 に示す。Jacob 的な方法において 1 段階目が $3.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、2 段階目が $7.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ と推定されたが、時間微分的な方法でも同程度の透水量係数を推定することができ、その時間的な変化も評価できることが確認できた。

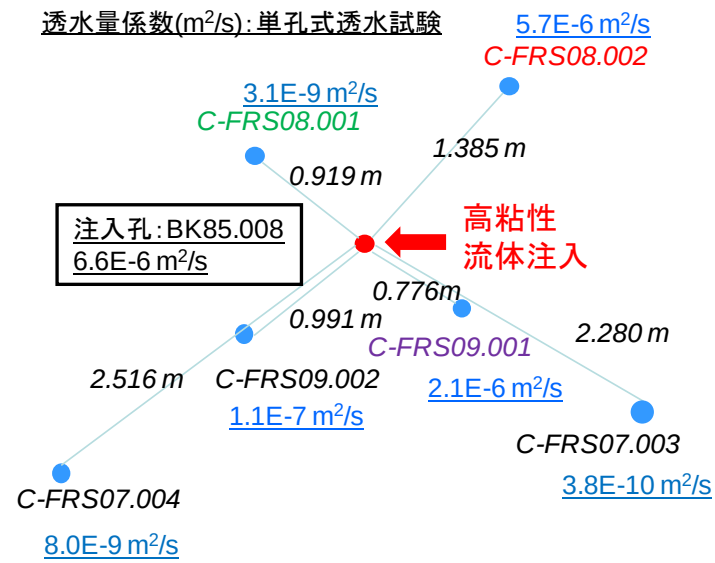


図 4. 5. 1-1 14m 地点でのボーリング孔配置と各孔での透水量係数

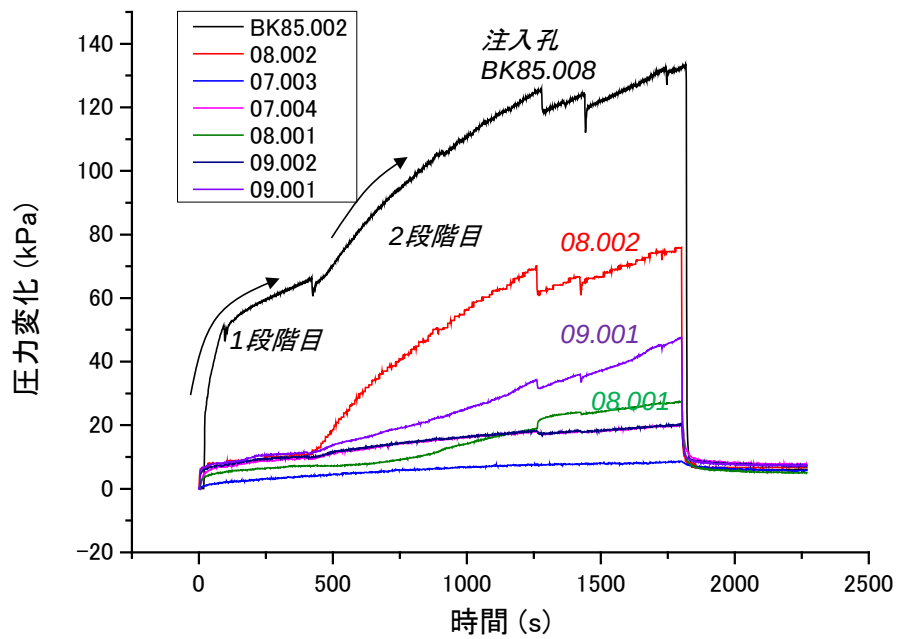


図 4. 5. 1-2 注入孔および観測孔での圧力の経時変化

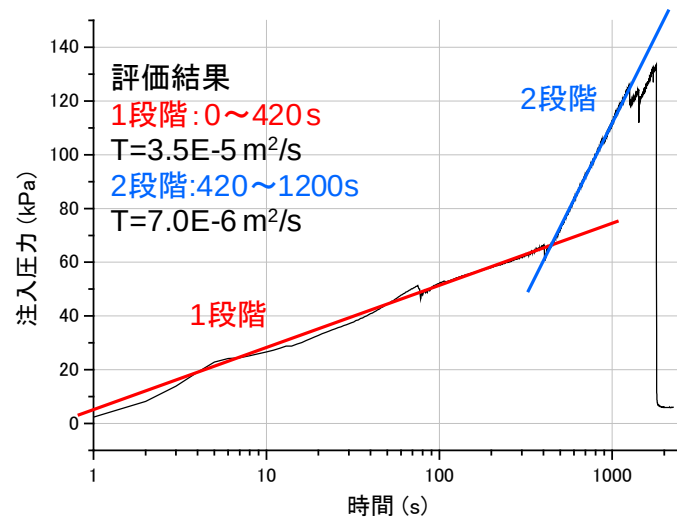


図 4.5.1-3 Jacob 的な方法による透水量係数の変化の評価結果

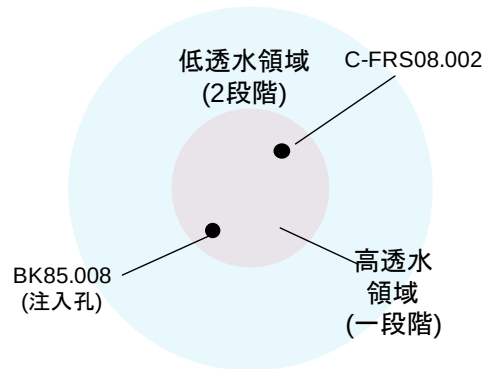


図 4.5.1-4 圧力応答から想定される透水係数場

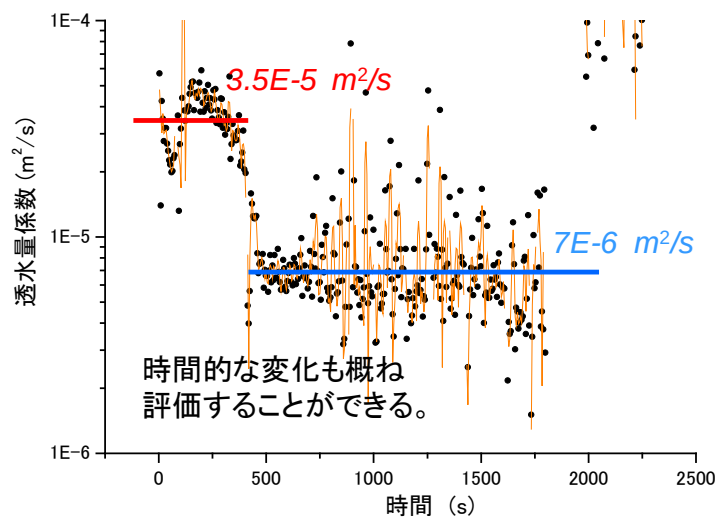


図 4.5.1-5 時間微分に基づく透水量係数の推定結果(14m 地点)

4.5.2 25m 地点での試験結果

25m 地点での高粘性流体の注入孔と観測孔の配置を図 4.5.2-1 に示す。この断面は 14m 地点と同様に、各ボーリング孔で 25m 地点の割れ目が確認された深度に基づいて割れ目面を推定し、各ボーリング孔間の距離を推定したものである。図には単孔式透水試験から求めた透水量係数もあわせて示した。

高粘性流体の注入は、中心の BK85.008 孔から実施した。数回程度試験を実施したがここでは、高粘性流体の粘性が 100cp、注入流量 200ml/min で注入した場合の試験結果について述べる。注入孔および観測孔での圧力応答を図 4.5.2-2 に示す。図から注入孔での圧力は二次関数的に上昇する。観測孔 C-FRS08.001 の圧力が 600s 付近から注入孔と同様に増加するため、この時点で観測孔 C-FRS08.001 に高粘性流体が到達したものと推定される。その後注入圧力は増加するものの他の観測孔における有意な反応は確認されていない。

注入圧力の二次関数的な増加から、透水量係数は注入孔からの距離と共に低下すると推定された。このため、図 4.5.2-3 のような透水係数場が推定された。

この注入孔での圧力応答について、時間微分に基づく方法で透水量係数を再評価した。時間微分に基づく方法で透水量係数の変化を評価した結果を図 4.5.2-4 に示す。図から透水量係数の時間的な低下が推定された。このため、高粘性流体の広がりに伴って透水量係数が低下しているものと推定された。

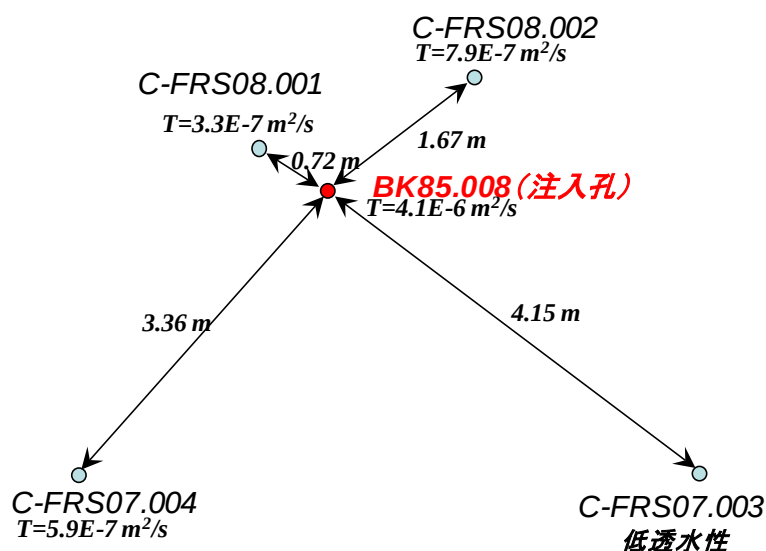


図 4.5.2-1 14m 地点でのボーリング孔配置と各孔での透水量係数

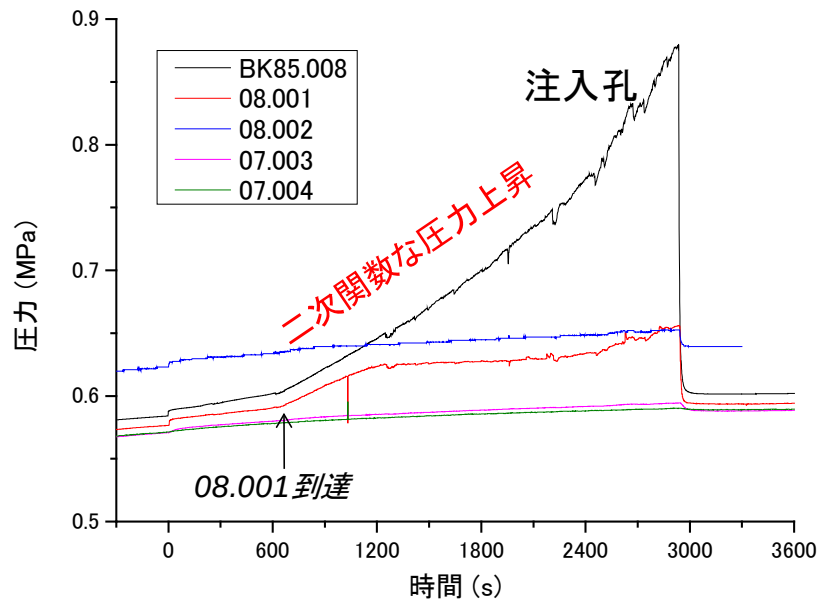


図 4.5.2-2 注入孔および観測孔での圧力の経時変化

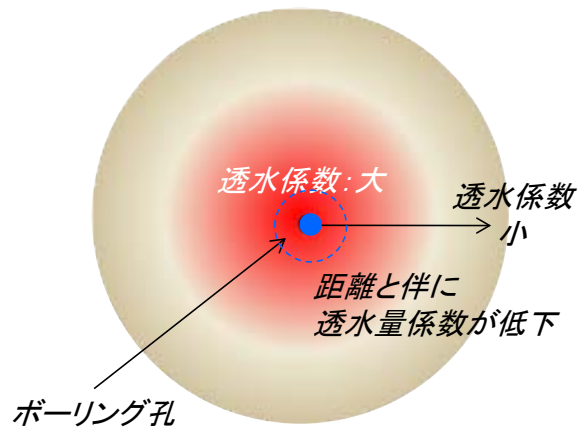


図 4.5.2-3 圧力応答から想定される透水係数場

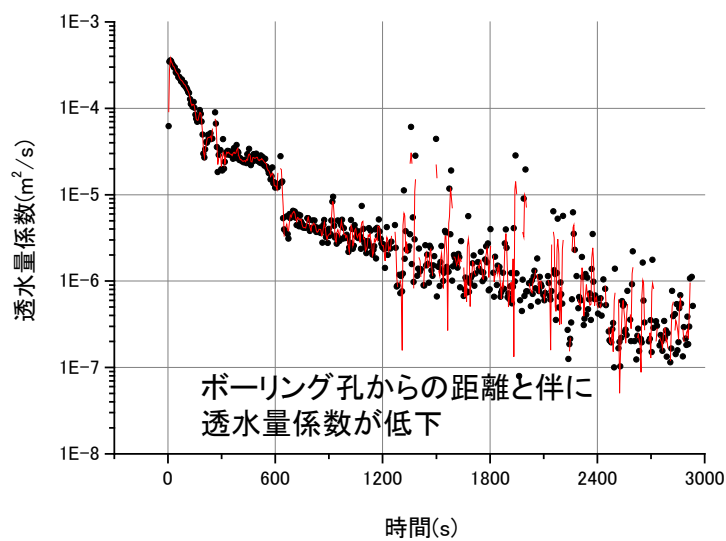


図 4.5.2-4 時間微分に基づく透水量係数の推定結果(25m 地点)

4.5.3 原位置試験結果の時間微分に基づく方法での評価

スイス Nagra の Grimsel Test において実施した 14m 地点と 25m 地点での原位置高粘性流体注入試験を時間微分に基づく方法で評価した。この結果、従来予想されていたように 14m 地点ではボーリング孔周辺に高透水場、その外側に低透水場の 2 つの透水係数場の存在が推定されることが確認できた。また、25m 地点でもボーリング孔から離れるにともない透水係数が低下する透水係数場が推定された。原位置では透水係数場も様々な形態をしていることが予想されここで示したように特に透水量係数が変化する場合も少なくないと考えられる。その意味で本方法は、時間的な透水量係数場の変化を評価することができ、あわせて高粘性流体の注入量からその体積も評価可能であるため、対象とする場の細かい不均質性を捉えるのに有効ではないかと考えられた。今後の評価においても、このような透水量係数の空間的な変化を考慮する予定である。

4.6 まとめと今後の課題

鋼管と軸対称モデルに高粘性流体を注入し、高粘性流体注入により鋼管の管径や軸対称モデルの割れ目幅が評価できるかどうかについて検討した。特に、管径が変化する場合や割れ目幅が変化する場合について検討を実施した。

鋼管試験では、管径が一定の場合には、管内の水の有無、流量にかかわらず適切に管径が評価できた。管径が変化する場合には、管径が太いものから細いものに変化する場合については適切に評価できるが、細いものから太いものに変化する場合には誤差が大きくなることが明らかになった。これは、管径が太くなる場合、圧力の増加率が低下するため、高粘性流体の水との混合による粘性低下や鋼管と高粘性流体の間に水が挟まるスベリなどの誤差による影響で、圧力の増加を識別しにくくなるためと考えられた。

軸対称割れ目での試験では、割れ目幅を制御するために、スペーサーによる割れ目幅の制御を 10cm 間隔で実施可能なモデルを作成し試験を実施した。この試験装置で定流量注入試験を実施した結果、圧力の増加が概ね理論通りとなることから、割れ目幅を適切に制御できることが確認できた。割れ目内に水の有無で試験結果には有意な影響がないことが確認できた。また、割れ目幅が変化する場合についても試験を実施し、高粘性流体の注入圧力の変化から割れ目幅の変化を評価できることを確認できた。これにより原位置で確認された圧力増加が 2 段階となる現象も、透水係数場が 2 つ存在することにより説明可能である。ただし、鋼管試験と同様に、割れ目幅が狭いものから広いものになる場合には、透水量係数の変化などの識別が難しいことが示唆された。

解析的な検討により、高透水部の存在が注入孔および観測孔での圧力応答に与える影響を確認した。注入孔での圧力応答は高透水部から注入した場合にはその広がりや透水性を評価できるものの、離れた場所に高透水部が存在する場合には検出が難しいことがわかった。一方で観測孔での圧力応答は、高透水部の存在によって変化するため、観測孔での圧力応答から高透水帯の存在を識別できる可能性があることがわかった。

Grimsel で実施した 14m 地点と 25m 地点での原位置試験結果の評価を、注入圧力の時間微分に基づいて評価する方法で実施した。この結果、14m 地点では注入開始後 400 秒程度で透水係数場が変化することが確認できた。25m 地点では高粘性流体の広がりと共に透水量係数が低下していくことを確認することができた。これらの結果から、過去に推定した透水係数場のモデルが妥当であることを確認することができた。

高粘性流体による割れ目の評価技術の理論的な妥当性が室内試験で確認されたことから、今後、原位置での透水係数場、割れ目幅、その広がりについて解析的に検討を実施する予定である。

参考文献

- 河西基、田中靖治、五十嵐敏文（1994）：高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発（その
1）一割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法一、電力中央研究所 研究報告 U93054.
- 河西基、田中靖治、五十嵐敏文（1995）：高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発（その
2）一割れ目系岩盤中の熱および核種の移行解析手法一、電力中央研究所 研究報告 U94053.
- 信越化学工業(2007)：メトローズ、<http://www.metolose.jp/industrial/index.s/html>.
- 長谷川琢磨、田中靖治、西垣誠(2007)：高粘性流体の注入による有効間隙率と流れの次元の評価，土
木学会論文集 C, Vo. 63, No. 1, pp. 132-142.